ТОМ 24, №3, 2024
eISSN 2687-1653
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Механика / Mechanics

Машиностроение и машиноведение / Machine Buiding and Machine Science

Информатика, вычислительная техника и управление / Information Technology, Computer Science and Management



www.vestnik-donstu.ru
DOI 10.23947/2687-1653



Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2000 года)

eISSN 2687–1653
DOI: 10.23947/2687–1653

Том 24, № 3, 2024

Создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях и перспективах в области механики, машиностроения, информатики и вычислительной техники. Издание является форумом для сотрудничества российских и иностранных ученых, способствует сближению российского и мирового научно-информационного пространства.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические, физико-математические науки)
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки)
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)
2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические, физико-математические науки)
2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки)
2.5.2 – Машиноведение (технические науки)
2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
2.5.9 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы (технические науки)

Индексация и архивация	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://vestnik-donstu.ru
Дата выхода в свет	30.09.2024





Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2000)

eISSN 2687–1653
DOI: 10.23947/2687–1653

Vol. 24, no. 3, 2024

The journal is aimed at informing the readership about the latest achievements and prospects in the field of mechanics, mechanical engineering, computer science and computer technology. The publication is a forum for cooperation between Russian and foreign scientists, it contributes to the convergence of the Russian and world scientific and information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:

– Theoretical Mechanics, Dynamics of Machines (Engineering Sciences)
– Deformable Solid Mechanics (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Mechanics of Liquid, Gas and Plasma (Engineering Sciences)
– Mathematical Simulation, Numerical Methods and Program Systems (Engineering Sciences)
– System Analysis, Information Management and Processing, Statistics (Engineering Sciences)
– Automation and Control of Technological Processes and Productions (Engineering Sciences)
– Software and Mathematical Support of Machines, Complexes and Computer Networks (Engineering Sciences)
– Computer Modeling and Design Automation (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
– Computer Science and Information Processes (Engineering Sciences)
– Machine Science (Engineering Sciences)
– Machine Friction and Wear (Engineering Sciences)
– Technology and Equipment of Mechanical and Physicotechnical Processing (Engineering Sciences)
– Engineering Technology (Engineering Sciences)
– Welding, Allied Processes and Technologies (Engineering Sciences)
– Methods and Devices for Monitoring and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment (Engineering Sciences)
– Hydraulic Machines, Vacuum, Compressor Equipment, Hydraulic and Pneumatic Systems (Engineering Sciences)

Indexing and Archiving	RSCI, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Name of the Body that Registered the Publication	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 78854 dated August 07, 2020, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and Publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	4 issues per year
Address of the Founder and Publisher	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	http://vestnik-donstu.ru
Date of Publication	30.09.2024

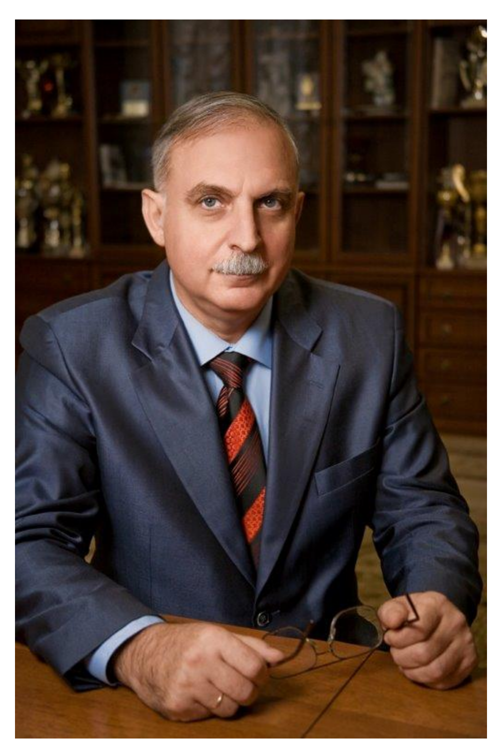


Содержание

Contents

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

65 лет Алексею Николаевичу Бескопыльному — ученому, педагогу, эксперту и руководителю



Алексей Николаевич Бескопыльный — профессор, доктор технических наук, ученый и специалист в области диагностики и мониторинга строительных конструкций, проректор по учебной работе и международной деятельности Донского государственного технического университета.

В 1981 году Алексей Николаевич окончил Ростовский инженерно-строительный институт по специальности «Инженер промышленного транспорта». Начал он свой трудовой путь с должности инженера научно-исследовательской лаборатории промышленного транспорта. После окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации, с 1986 по 1994 годы, прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией управления надежностью машин.

В 1997 году А.Н. Бескопыльный защитил докторскую диссертацию в Ростовском государственном строительном университете (РГСУ) по теме «Метод определения механических свойств и контроля качества конструкционных сталей ударным вдавливанием индентора». С 1997 по 1998 годы трудился в качестве заместителя, а с 1998 по 2005 годы — директора дорожно-транспортного института РГСУ. С 2005 по 2016 годы успешно выполнял в вузе обязанности проректора по воспитательной работе, проректора по учебной работе и проректора по организации образовательной деятельности.

В результате реорганизации в начале 2016 года РГСУ вошел в состав Донского государственного технического университета (ДГТУ) как Академия строительства и архитектуры, и Алексей Николаевич был сразу назначен ее директором. С 2018 по 2021 годы трудился в должности проректора по учебной работе и подготовки кадров высшей квалификации, а с 2021 года и по настоящее время — проректор по учебной работе и международной деятельности ДГТУ.

А.Н. Бескопыльный внес значительный вклад в модернизацию и развитие системы подготовки кадров высшей квалификации и укрепление сотрудничества с зарубежными партнерами опорного вуза, в том числе и в рамках программы «Приоритет-2030».

А.Н. Бескопыльный — известный ученый в области строительства, неразрушающих методов контроля динамических сооружений. Его педагогическая и научная деятельность отражена в 240 трудах, включая 3 монографии, 5 учебников и учебных пособий, 9 патентов. За последние пять лет им опубликовано более 220 научных работ, из них 159 — в индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science.

При активной поддержке Алексея Николаевича в ДГТУ созданы Академия публикационной активности и система научно-организационной и финансовой поддержки авторов, в том числе молодых ученых и специалистов; издаются 10 научных журналов, 6 из которых входят в Перечень ВАК. Инициативы проректора позволяют вузу выполнять и перевыполнять планы публикационной деятельности, развивая и повышая при этом профессиональные компетенции авторов в области международной научной коммуникации и академического письма. Большой вклад как проректор Алексей Николаевич внес в совершенствование образовательного процесса, внедрение информационных и компьютерных технологий, подготовку инженерных и научно-педагогических кадров высокой квалификации. Под его руководством успешно подготовлены докторские и кандидатские диссертации.

А.Н. Бескопыльным разработаны и реализуются научно-образовательные программы технологической магистратуры в рамках 14-ти образовательных проектов в сотрудничестве с индустриальными партнерами Донского края: ПАО «Роствертол», ОАО «ПК «НЭВЗ»», ПАО «Тагмет», ООО «КЗ «Ростсельмаш»», АО «Алюминий Металлург Рус».

Результаты научной и инновационной деятельности Алексея Николаевича внедрены Министерством транспорта Российской Федерации, Министерством транспорта Ростовской области на 53-х предприятиях России, среди которых ООО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (Москва), Ассоциация «Инженерная группа Стройпроект» (Санкт-Петербург), Департамент автомобильных дорог и организации дорожного движения города Ростова-на-Дону и другие.

Алексей Николаевич Бескопыльный — обладатель Почетной грамоты Министерства образования и науки Российской Федерации (2010 г.); нагрудного знака «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» (2003 г.); знака «Почетный строитель России» (2011 г.), медали «За заслуги в развитии строительной индустрии» (2011 г.).

Коллектив редакции от всей души поздравляет Алексея Николаевича Бескопыльного — главного редактора журнала «Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)» — с 65-летним юбилеем и желает здоровья, благополучия, вдохновения и энергии для новых научных достижений на благо родного университета и строительного образования!

МЕХАНИКА
MECHANICS





УДК 620.17.4
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-215-226

Оригинальное эмпирическое исследование

Повышение межслойной трещиностойкости полимерных тканевых композитов с помощью локального трехмерного армирования (фелтинга)

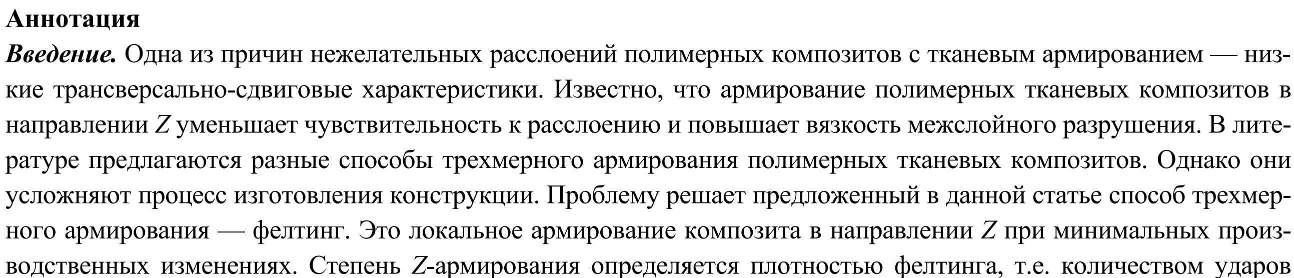


EDN: KVEMQM

Г.А. Форенталь[1] ✉, **С.Б. Сапожников**[1,2]
[1] Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация
[2] Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Российская Федерация
✉ gforental@mail.ru



Аннотация



Введение. Одна из причин нежелательных расслоений полимерных композитов с тканевым армированием — низкие трансверсально-сдвиговые характеристики. Известно, что армирование полимерных тканевых композитов в направлении *Z* уменьшает чувствительность к расслоению и повышает вязкость межслойного разрушения. В литературе предлагаются разные способы трехмерного армирования полимерных тканевых композитов. Однако они усложняют процесс изготовления конструкции. Проблему решает предложенный в данной статье способ трехмерного армирования — фелтинг. Это локальное армирование композита в направлении *Z* при минимальных производственных изменениях. Степень *Z*-армирования определяется плотностью фелтинга, т.е. количеством ударов иглы на 1 см^2 тканевого пакета. Цель работы — оценить влияние фелтинга на межслойную трещиностойкость композитного материала.

Материалы и методы. Межслойную вязкость разрушения G_{IIc} определяли на стеклоткани полотняного переплетения с фелтингом 10 см$^{-2}$. Материал пропитывали смолой Этал-370 и отвердителем Этал-45. Эксперименты по стандартам ASTM D7905M–14 и ГОСТ 33685–2015 проводили на испытательной машине Instron 5900R. Напряженное состояние у вершины трещины анализировали с позиции нелокальной теории прочности в программе Ansys Workbench (опция «статический прочностной анализ»). Задействовали метод конечных элементов (МКЭ).

Результаты исследования. Для образцов рассмотрели кривые «нагрузка — перемещение». Вычислили значения G_{IIc}. Обобщили итоги ENF-испытаний для плотности фелтинга 0 см$^{-2}$ и 10 см$^{-2}$. Сравнили контрольные образцы и образцы с фелтингом. В последнем случае G_{IIc} оказалась выше на ~33 %. Рассчитали напряженное состояние у вершины трещины при DCB- и ENF-нагружении. Визуализировали в виде графиков и цветовых диаграмм зависимости максимальных нормальных и касательных напряжений, а также перемещений. Для получения расчетных зависимостей «нагрузка — перемещение» с помощью МКЭ использовали обратный метод получения трансверсально-сдвиговых констант. Нагружение по схеме DCB показало, что фелтинг позволяет увеличить предел прочности на растяжение в направлении *Z* на ~18 %, с 39 до 46 МПа, а в плоскости *XZ* — на ~16 %, с 77 МПа до 89 МПа.

Обсуждение и заключение. Фелтинг как способ локального трехмерного армирования усиливает межслойную трещиностойкость полимерных тканевых композитов. Он позволяет сократить площадь расслоений после локальных ударов при эксплуатации конструкций. Гибкая технология фелтинга дает возможность создавать зоны с произвольной плотностью ударов, повышая трещиностойкость лишь в необходимых местах конструкций. МКЭ-анализ напряженного состояния у вершины трещины в рамках нелокальной теории прочности показал, что в прочностных расчетах трещину расслоения можно рассматривать как концентратор напряжений.

Ключевые слова: армирование полимерных тканевых композитов, трансверсально-сдвиговая прочность, межслойная трещиностойкость, межслоевая вязкость разрушения, фелтинговое локальное трехмерное армирование

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам Никонову А.В., Херувимову А.В. за помощь в изготовлении образцов для экспериментальных исследований.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075–15–2022–1023).

Для цитирования. Форенталь Г.А., Сапожников С.Б. Повышение межслойной трещиностойкости полимерных тканевых композитов с помощью локального трехмерного армирования (фелтинга). *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):215–226. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-215-226

Original Empirical Research

Increasing the Interlayer Fracture Toughness of Polymer Fabric Composites Using Local 3D-Reinforcement (Felting)

Galina A. Forental[1] ✉, **Sergey B. Sapozhnikov**[1,2]

[1] South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

[2] Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russian Federation

✉ gforental@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the reasons for undesirable delamination of polymer composites with fabric reinforcement is low transverse shear properties. It is known that the reinforcement of polymer fabric composites in the *Z* direction reduces the sensitivity to delamination and increases the viscosity of interlayer fracture. Various methods of three-dimensional reinforcement of polymer fabric composites are proposed in the literature. However, they complicate the manufacturing process of the structure. The problem is solved by the method of three-dimensional reinforcement proposed in this article — felting. This is a local reinforcement of the composite in the *Z* direction with minimal production changes. The degree of *Z*-reinforcement is determined by the felting density, i.e., the number of needle punches per 1 cm^2 of the fabric package. The work is aimed at evaluating the effect of felting on the interlayer crack resistance of a composite material.

Materials and Methods. The interlayer fracture toughness G_{IIc} was determined on a cross-woven fiberglass with felting of 10 cm^{-2}. The material was impregnated with Etal-370 resin and Etal-45 hardener. Experiments according to ASTM D7905M–14 and GOST 33685–2015 standards were carried out on an Instron 5900R test machine. The stress state at the crack tip was analyzed with regard to the nonlocal strength theory in the ANSYS Workbench program (option “static strength analysis”). The finite element method (FEM) was used.

Results. The “load — displacement” curves were considered for the samples. Values G_{IIc} were calculated. The results of ENF tests for felting density of 0 cm^{-2} and 10 cm^{-2} were summarized. Control samples and felting samples were compared. In the latter case, G_{IIc} turned out to be ~33% higher. The stress state at the crack tip was calculated under DCB and ENF loading. The dependences of maximum normal and shear stresses, as well as displacements, were visualized in the form of graphs and color charts. To get the calculated “load — displacement” dependences using FEM, the reverse method of obtaining transverse shear constants was used. DCB loading showed that felting provided increasing the rupture strength in the *Z* direction to ~18%, by 39 to 46 MPa, and in the planes *XZ*— to ~16%, by 77 to 89 MPa.

Discussion and Conclusion. Felting as a method of local three-dimensional reinforcement enhances the interlayer crack resistance of polymer fabric composites. It provides reducing the area of stratifications after local impacts during the operation of structures. Flexible felting technology makes it possible to create zones with an arbitrary impact density, increasing fracture toughness only in the required places of structures. The FEM analysis of the stress state at the crack tip within the framework of the nonlocal strength theory has shown that in strength calculations, the stratification crack can be considered as a stress concentrator.

Keywords: reinforcement of polymer fabric composites, transverse shear strength, interlayer crack resistance, interlaminar fracture toughness, felting local three-dimensional reinforcement

Acknowledgements. The authors would like to thank colleagues A.V. Nikonov and A.V. Kheruvimov for their help in preparing the samples.

Funding Information. The research was done within the framework of the Program for the Creation and Development of the World-Class Scientific Center “Supersound” for 2020–2025 with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement no. 075–15–2022–1023, dated May 17, 2022).

For Citation. Forental GA, Sapozhnikov SB. Increasing the Interlayer Fracture Toughness of Polymer Fabric Composites Using Local 3D-Reinforcement (Felting). *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):215–226. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-215-226

Введение. Волокнистые полимерные композиты широко применяются в авиационной и космической технике благодаря значительной жесткости и прочности в направлении укладки волокон (плоскость *XY*) [1]. Однако трансверсально-сдвиговая прочность этих материалов достаточно низкая [2], так как определяется особенностями полимерной матрицы [3]. Армирование полимерных тканевых композитов в направлении *Z* позволяет уменьшить чувствительность к расслоению, т.е. повысить вязкость межслойного разрушения [4].

Известны различные методы трехмерного армирования полимерных тканевых композитов [5]. Однако они создают дополнительные сложности при изготовлении конструкций из полимерных тканевых композитов [6]. Предложенный в данной работе способ трехмерного армирования — фелтинг [7] позволяет получить локально армированный в направлении *Z* композит при минимальных изменениях в процессе производства. Степень *Z*-армирования при этом определяется плотностью фелтинга, т.е. количеством ударов иглой на 1 см^2 площади тканевого пакета [8].

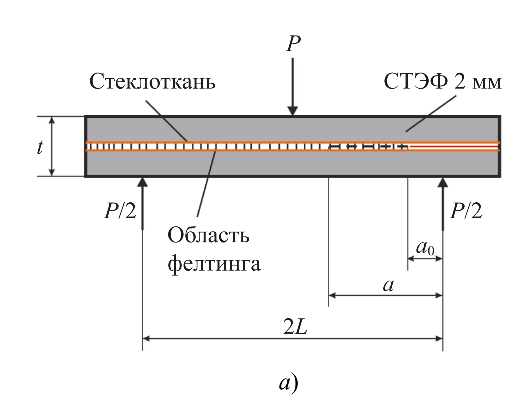
Использование различных методик определения трещиностойкости полимерных композитных материалов [9] позволяет проводить исследования на различных образцах [10] и при различных способах нагружения [11]. Один из самых распространенных подходов — метод трехточечного изгиба. В этом случае используется образец с расслоением в виде балки. Речь идет о ENF-испытаниях (от англ. end notched flexure — изгиб образца с краевым расслоением) [12], что предполагает нагружение поперечным сдвигом. Это дает возможность определить межслоевую вязкость разрушения G_{IIc} — разрушение по моде II. В вершине трещины возникают высокие касательные напряжения [13].

Еще один распространенный способ определения трансверсальных характеристик — метод двухконсольной балки (DCB-испытания (от англ. double cantilever beam — двухконсольная балка)). При DCB-испытаниях значение межслоевой вязкости разрушения G_{Ic} определяется при нагружении отрывом — разрушение по моде *I* [14]. Трещина расслоения распространяется за счет действия нормальных напряжений [15].

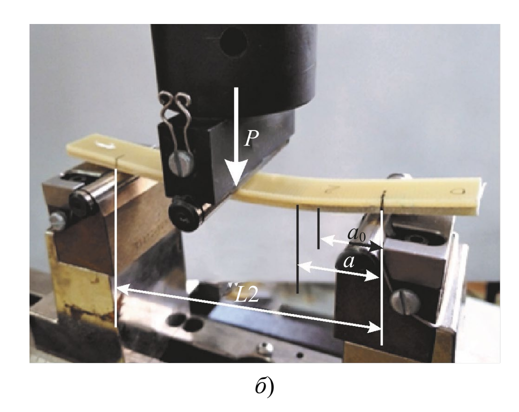
Цель представленной работы — оценить влияние фелтинга на межслойную трещиностойкость композитного материала. Для этого провели ENF-испытания (изгиб образца с краевым расслоением) композитного материала, обладающего повышенной трещиностойкостью за счет применения фелтинга. Ранее авторы изучали влияние фелтинга на межслойную трещиностойкость композитного материала при DCB-испытаниях [16]. Создали расчетную модель, основанную на нелокальной теории прочности. Она позволяет с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для трещин различной длины рассчитать напряжения, возникающие в образцах ENF и DCB.

Материалы и методы

Экспериментальное определение межслойной трещиностойкости методом ENF. Образцы изготавливали из стеклоткани полотняного переплетения с толщиной слоя 0,2 мм. Пакет сухой стеклоткани из двух слоев пробивали на фелтинговой машине с плотностью фелтинга 10 см$^{-2}$ (на 1 см^2 сухой стеклоткани приходится 10 ударов иглой фелтинговой машины). Пакет стеклоткани пробивали таким образом, чтобы после пропитки и отверждения начальная трещина не попадала на область фелтинга. Для создания начальной трещины между двумя слоями стеклоткани помещали алюминиевую фольгу толщиной 11 мкм, покрытую разделительной смазкой Вс-М. Стеклоткань пропитывали смолой Etal-370 и отвердителем Etal-45. Для изготовления контрольных образцов два слоя сухой стеклоткани пропитали смолой Etal-370 и отвердителем Etal-45 без пробивки на фелтинговой машине. После пропитки к двум слоям стеклоткани приклеивали пластины из стеклопластика СТЭФ (рис. 1 *а*). Образцы длиной 150 мм и шириной 16 мм получали путем разрезания отвержденных пластин с помощью высокоскоростной дисковой пилы.



а)



б)

Рис. 1. Конфигурация и параметры испытаний ENF по моде II:
а — схема нагружения; *б* — фото испытаний

Задействовали испытательную машину Instron 5900R со скоростью нагружения 10 мм/мин. Расстояние между опорами $2L$ = 100 мм. Начальная длина трещины у всех образцов a_0 = 25 мм. Для выполнения калибровки податливости в широком диапазоне длин трещины разгрузили и снова нагрузили по одному образцу каждого типа. Образовавшаяся трещина служила начальной трещиной в следующем цикле нагружения.

Для обработки результатов испытаний использовали калибровку, рекомендованную стандартами ASTM D7905M–14[1] и ГОСТ 33685–2015[2]. Такой подход позволяет определить параметры A и m для каждого образца с фелтингом и каждого контрольного образца без фелтинга из линейной зависимости двух величин — податливости образца C и куба длины трещины a^3:

$$C\left(\delta/P(\delta)\right) = A + m \cdot a^3, \tag{1}$$

где P — нагрузка, прикладываемая к образцу; δ — перемещение.

После калибровки и определения параметров A и m можно найти длину трещины из выражения (1):

$$a = \left(\frac{C - A}{m}\right)^{1/3}. \tag{2}$$

Момент начала расслоения определяется условием $C(\delta) = C(P_{max})$. Значение межслойной вязкости разрушения при начале отслоения (развитие трещины):

$$G_{\text{II}c} = \frac{3m \cdot P_{max}^2 \cdot a^2}{2b}, \tag{3}$$

где P_{max} — максимальная нагрузка; a — длина трещины, рассчитанная по формуле (2) при нагрузке P_{max}; b — ширина образца.

Расчет напряженного состояния у вершины трещины при нагружении по схемам DCB и ENF. Оценка напряженного состояния у трещиноподобного концентратора проведена с позиции подходов, которые используют нелокальные напряжения [17], т.е. осредненные на некоторой базе [18]. В расчетную модель также закладывали допущение о линейно-упругом поведении материала вплоть до разрушения [16].

Основная гипотеза: за развитие трещиноподобного концентратора ответственен критерий прочности композита, включающий все компоненты осредненных на базе λ напряжений (рис. 2):

$$\left(\frac{max\,\sigma_{z\lambda}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{max\,\sigma_{x\lambda}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{max\,\tau_{xz\lambda}}{S}\right)^2 - \frac{max\,\sigma_{z\lambda} \cdot max\,\sigma_{x\lambda}}{Z_t \cdot X_t} \le 1, \tag{4}$$

где Z_t и X_t — пределы прочности на растяжение в направлениях Z и X; S — предел прочности на сдвиг в плоскости XZ.

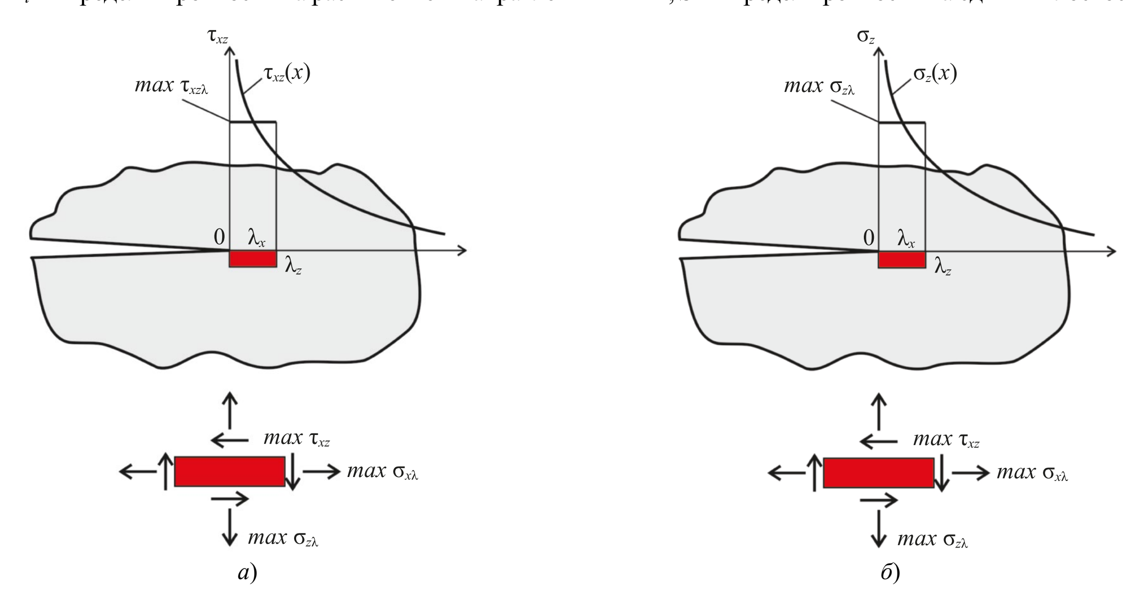


Рис. 2. Осредненные на базе λ напряжения у вершины трещины:
а — ENF-испытания; *б* — DCB-испытания

[1] ASTM D7905/D7905M–14. *Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.* URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/89096/03be6b5e53664f13a8703bb4342d981a/ASTM-D7905-D7905M-14.pdf (дата обращения: 22.04.2024).

[2] ГОСТ 33685–2015. *Композиты полимерные. Метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127774 (дата обращения: 22.04.2024).

В связи с наличием плоскостей симметрии для ENF-нагружения построили трехмерную модель 1/2 образца с трещиной (рис. 3), для DCB-испытаний — 1/4 образца с трещиной (рис. 4). Расчеты проводили в программе Ansys Workbench (опция «статический прочностной анализ», static structural).

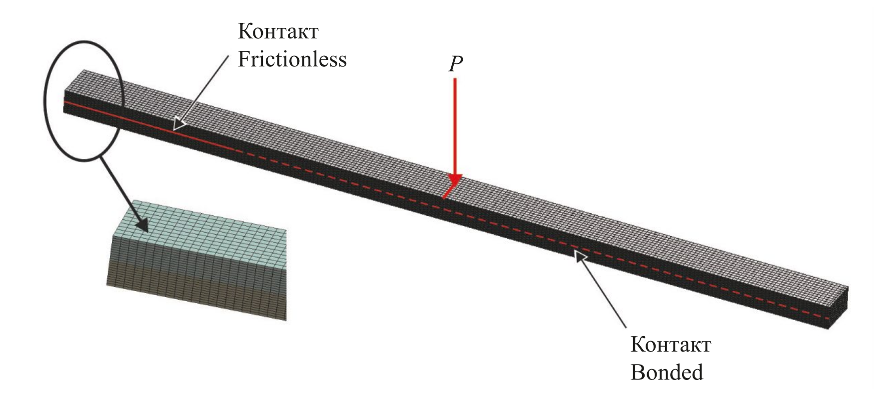


Рис. 3. Конечно-элементная модель 1/2 образца и фрагмент сетки для ENF-испытаний

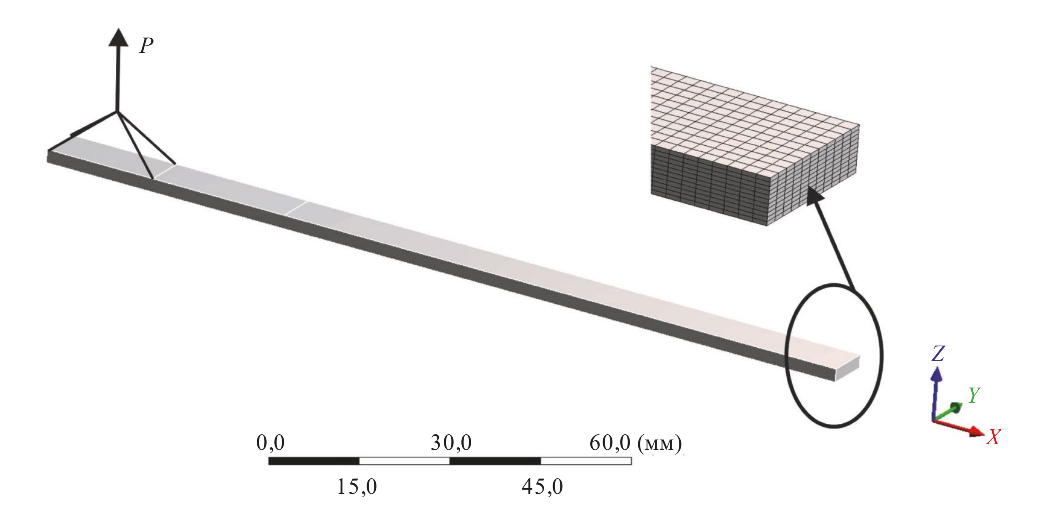


Рис. 4. Конечно-элементная модель 1/4 образца и фрагмент сетки для DCB-испытаний

При создании сетки конечных элементов задавали параметр $\lambda_x = 0{,}75$ мм по ширине образца [19] и параметр $\lambda_z = 0{,}2$ мм по толщине образца, что соответствует толщине модифицированного слоя [20]. Один конечный элемент по толщине слоя задавали в соответствии с теорией слоев (layer wise theory), используемой при оценке прочности слоев в рамках мезомеханики композитов [21]. В ENF-испытаниях общие перемещения в образце намного больше локальных перемещений от нагружающего ролика (рис. 1 *б*), поэтому в местах приложения нагрузок и опор не делали сгущение сетки конечных элементов (рис. 3). Свойства стеклопластика, использованные в расчете:

– модули упругости $E_x = E_y = 23$ ГПа, $E_z = 9$ Гпа;

– модули сдвига $G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = 6\,000$ Гпа;

– коэффициенты Пуассона $\mu_{xy} = 0{,}15$, $\mu_{yz} = \mu_{xz} = 0{,}3$ [22].

Так как объемная доля трансверсального армирования меньше 1 % [16], то в расчетах принимали, что упругие свойства стеклопластика не изменяются при наличии фелтинга.

Зависимость $P(\delta)$ рассчитали в соответствии с описанной ниже последовательностью.

1. Выполнили МКЭ-расчет максимальных напряжений $max\ \sigma_{z\lambda}$, $max\ \sigma_{x\lambda}$ и $max\ \tau_{xz\lambda}$ и перемещений δ точки приложения нагрузки $P = 1$ Н для трещин с заданными длинами в диапазоне $a = 20$–90 мм (DCB) и $a = 25$–40 мм (ENF).

2. Методом наименьших квадратов построили аппроксимационные зависимости $\sigma_{z\lambda} = f(a, P) = P \cdot b_1 \cdot a$; $\sigma_{x\lambda} = f(a, P) = P \cdot b_2 \cdot a$; $\tau_{xz\lambda} = f(a, P) = P \cdot b_3 \cdot a$; $\delta = f(a, P) = P \cdot c_1 \cdot a^3$ (DCB) и $\sigma_{z\lambda} = f(a, P) = P \cdot b_1 \cdot a$; $\sigma_{x\lambda} = f(a, P) = P \cdot b_2 \cdot a$; $\tau_{xz\lambda} = f(a, P) = P \cdot (b_3 \cdot a + d_3)$; $\delta = f(a, P) = P \cdot (c_1 \cdot a^3 + c_2 \cdot a^2 + c_3 \cdot a + c_4)$ (ENF).

3. Определили нагрузку $P_{cr}(a_0)$ и перемещение δ_{cr}, при которых начальная длина трещины a_0 скачкообразно увеличится на $\lambda_x = 0{,}75$ мм при нарушении критерия прочности (4).

4. При длине трещины $a_0+n\lambda$ определили нагрузки $P(a_0+n\lambda)$ и перемещения $\delta(n)$ для $n > 0$.

Результаты исследования

Результаты экспериментального определения межслойной трещиностойкости методом ENF. На рис. 5 представлены кривые «нагрузка — перемещение» для всех испытанных образцов. Все кривые «нагрузка — перемещение» имеют область с постоянной податливостью (C_{lin}), соответствующую линейному соотношению «нагрузка — перемещение». Значения C_{lin} использовали для калибровки.

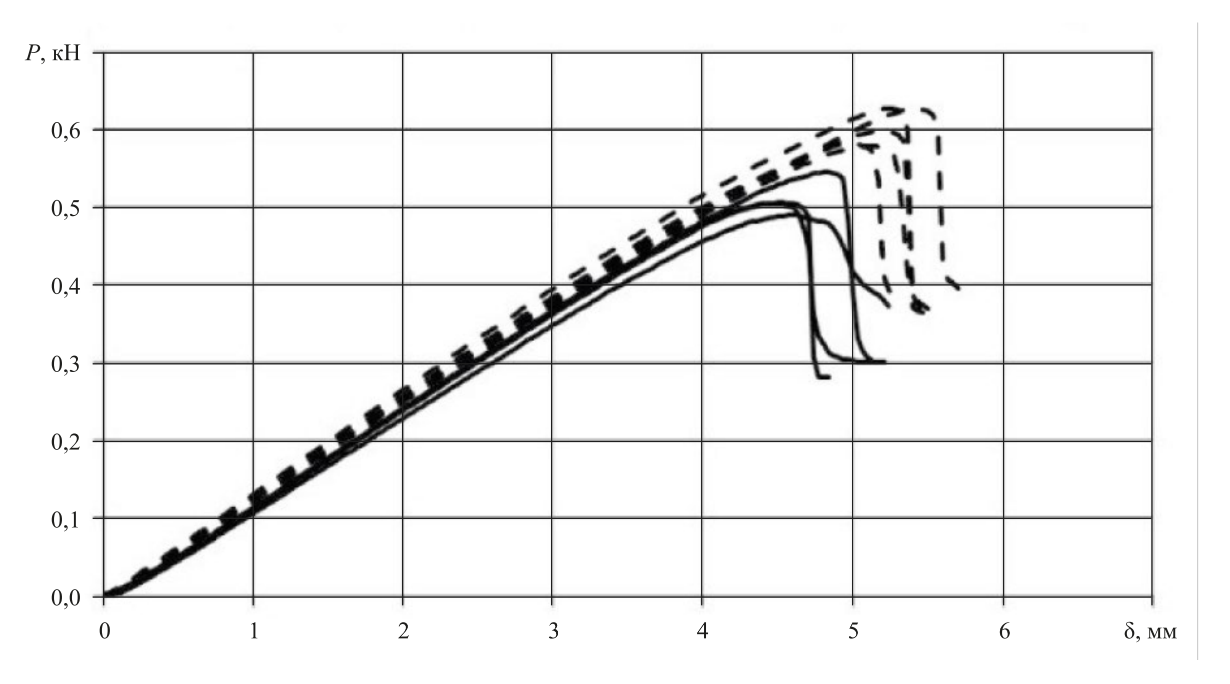


Рис. 5. Диаграммы «нагрузка — перемещение» ENF-испытаний:
——— без фелтинга; — — — с фелтингом

На рис. 6 представлены калибровочные кривые. Для образцов с фелтингом и без фелтинга податливость пропорциональна кубу длины трещины.

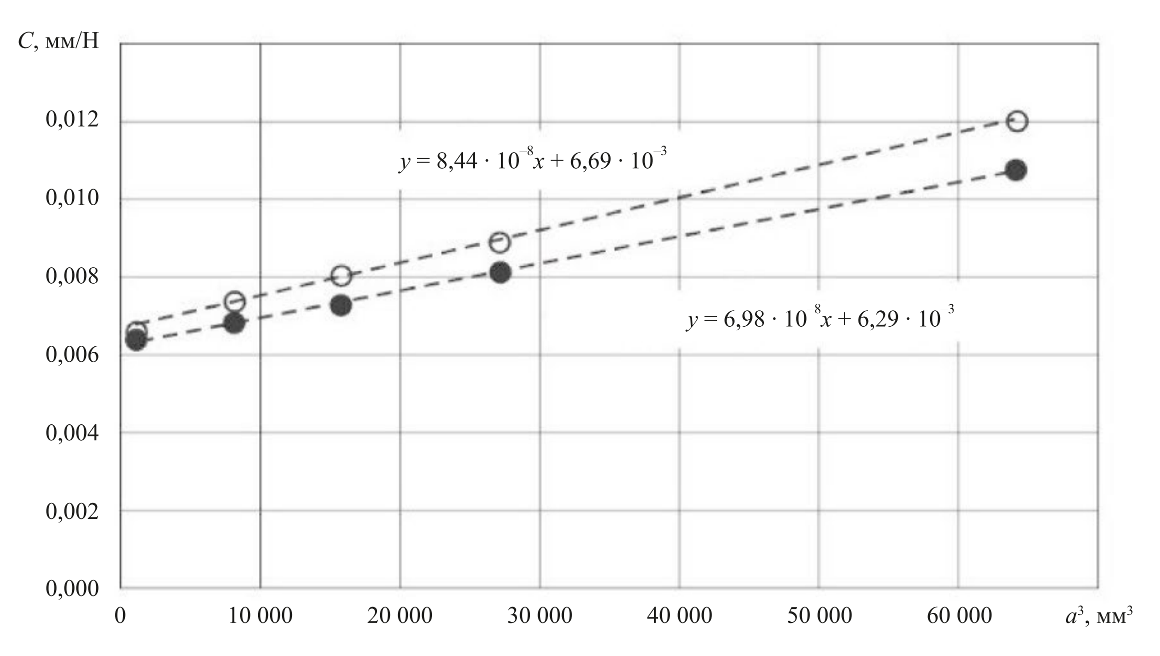


Рис. 6. Зависимость податливости образца C от куба длины трещины a^3:
○ — без фелтинга; ● — с фелтингом

Для расчета значений длины трещины a^*, соответствующих податливости в начале расслоения $C(P_{max})$, использовали полученные калибровочные кривые и уравнение (2). Для найденных значений длины трещины a^* с помощью уравнения (3) вычислили значения G_{IIc}. Результаты приводятся в таблице 1.

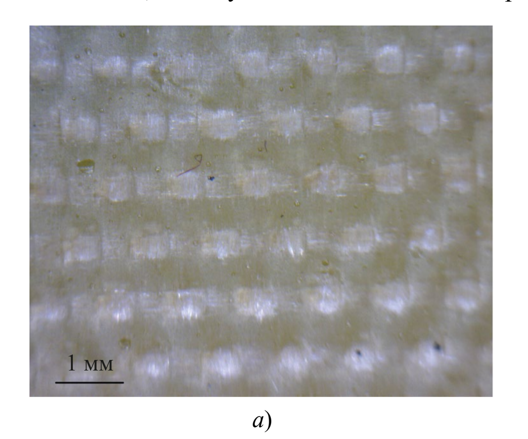
Таблица 1

Результаты ENF-испытаний

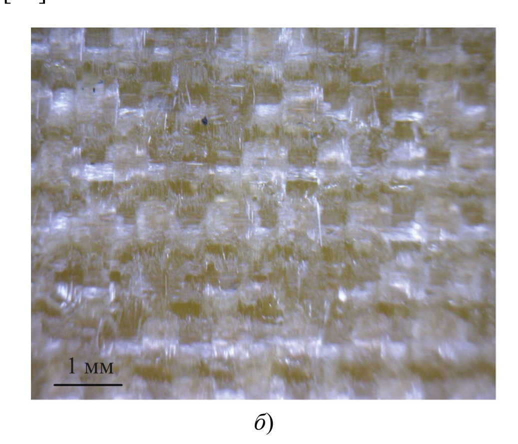
Плотность фелтинга, см$^{-2}$	a_0, мм	C_{lin}, мм/Н	$C_{(Pmax)}$, мм/Н	a*, мм	P_{max}, Н	G_{IIc}, кДж/м^2	G_{IIc} (среднее значение), кДж/м^2 (CV)
0	25	8,032	8,845	29,4	504,6	1,723	1,840 ± 0,126 (6,9 %)
0	25	7,980	8,807	29,3	544,6	1,983	
0	25	8,299	9,392	31,7	489,4	1,908	
0	25	7,905	8,900	29,7	505,2	1,746	
10	25	7,587	8,337	30,8	627,3	2,432	2,441 ± 0,154 (6,3 %)
10	25	7,849	8,677	32,4	625,8	2,682	
10	25	7,937	8,811	33,0	578,4	2,376	
10	25	7,824	8,594	32,1	581,4	2,261	
10	25	7,880	8,818	33,1	589,3	2,456	

Примечание: CV — Коэффициент вариации (от англ. coefficient variation).

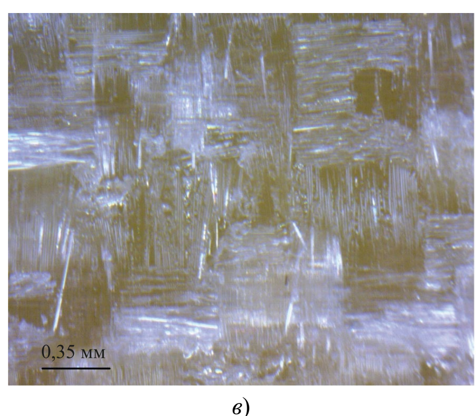
Образцы с фелтингом показали значительное (на ~33 %) увеличение межслойной вязкости разрушения G_{IIc} по сравнению с контрольными образцами. После испытаний образцы с фелтингом разделяли острым ножом и рассматривали под микроскопом. Микрофотографии зоны без фелтинга (область начальной трещины) и зоны с фелтингом (область развития трещины) представлены на рис. 7. При развитии трещины разрушаются вытянутые при фелтинге волокна, потому что их длина больше критической [16].



а)



б)



в)

Рис. 7. Микрофотографии образцов с фелтингом после ENF-испытаний:
а — зона без фелтинга (область начальной трещины); *б* — зона с фелтингом (область развития трещины);
в — зона с фелтингом (увеличенный масштаб)

Результаты расчета напряженного состояния у вершины трещины при нагружении по схемам DCB и ENF. На рис. 8, 9 показаны зависимости напряжений *max* $\sigma_{z\lambda}(a)$, *max* $\sigma_{x\lambda}(a)$, *max* $\tau_{xz\lambda}(a)$ и перемещений $\delta(a)$. Условия: P = 1 Н, нагружение по схемам DCB и ENF.

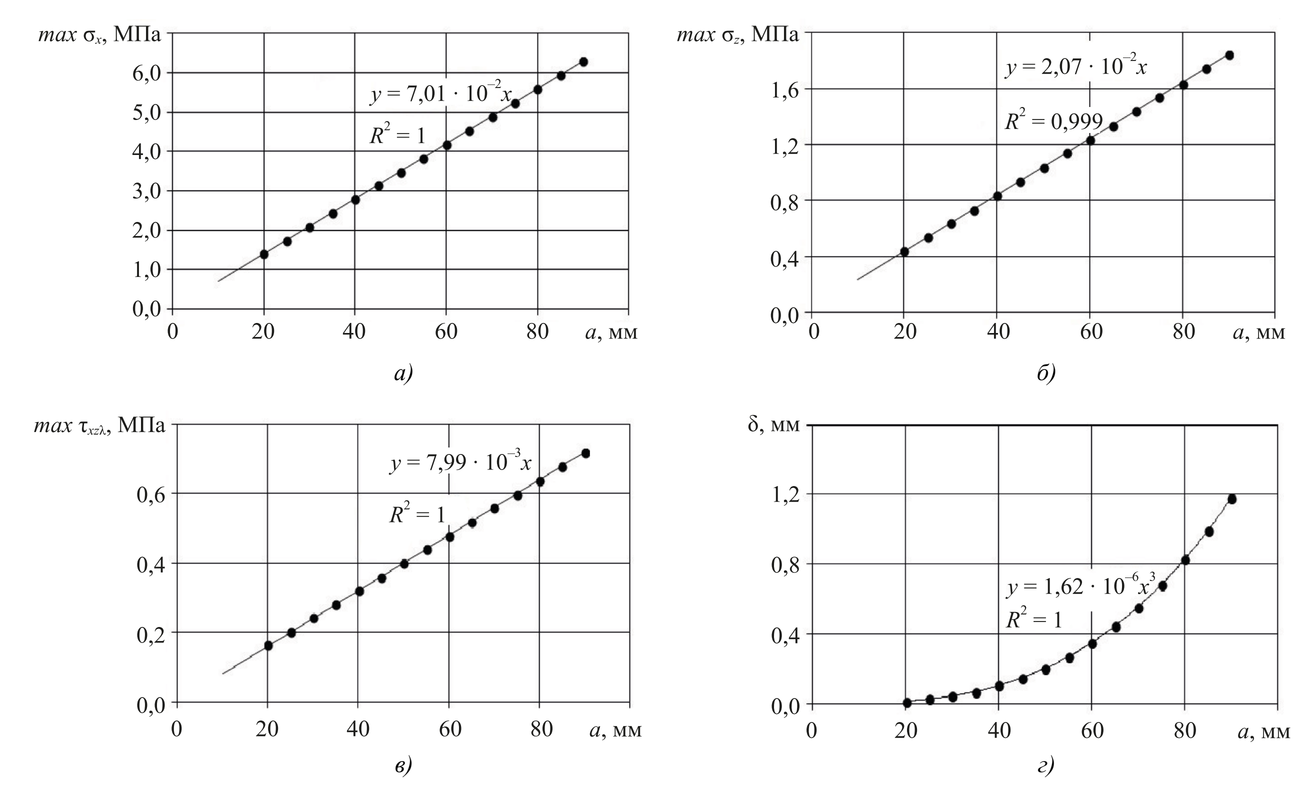


Рис. 8. DCB-нагружение. Зависимости максимальных напряжений и перемещений от длины трещины при P = 1 Н: *а* — зависимость нормальных напряжений *max* $\sigma_{x\lambda}(a)$; *б* — зависимость нормальных напряжений *max* $\sigma_{z\lambda}(a)$; *в* — зависимость касательных напряжений *max* $\tau_{xz\lambda}(a)$; *г* — зависимость перемещений $\delta(a)$

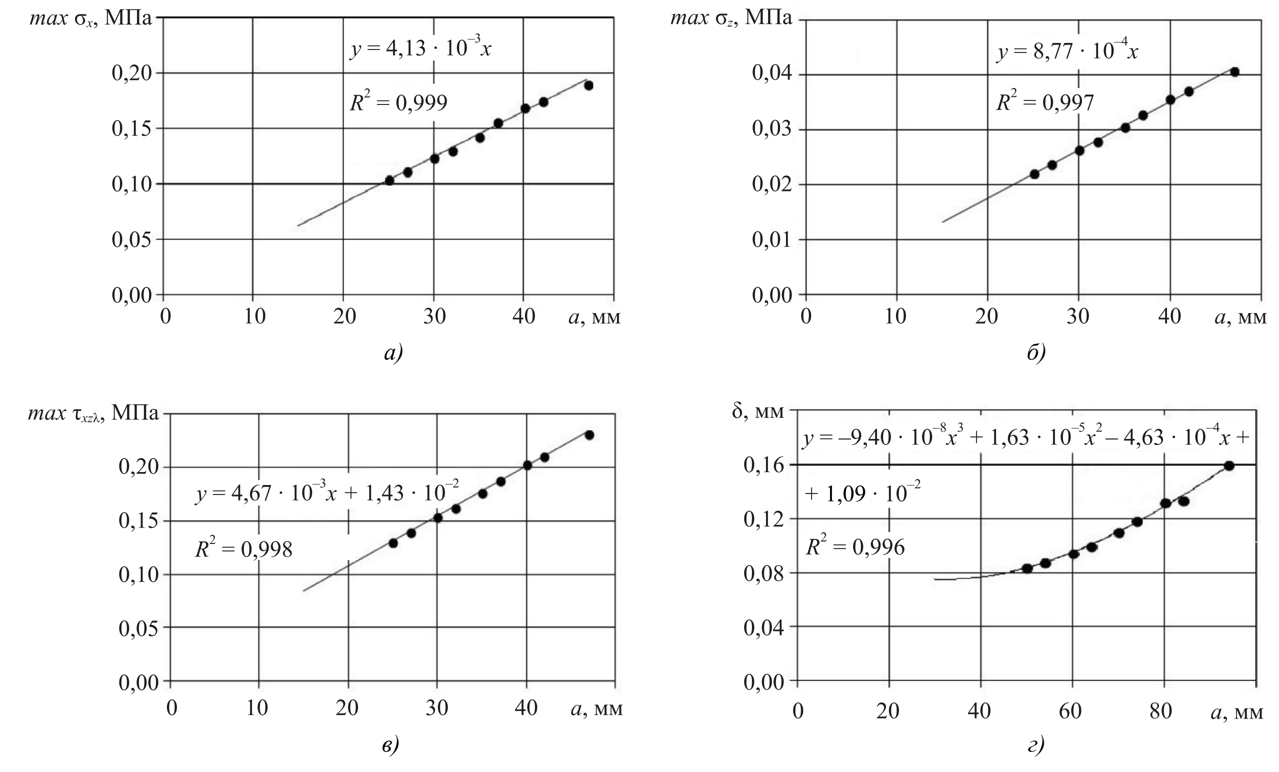


Рис. 9. ENF-нагружение. Зависимости максимальных напряжений и перемещений от длины трещины при P = 1 Н: *а* — зависимость нормальных напряжений *max* $\sigma_{x\lambda}(a)$; *б* — зависимость нормальных напряжений *max* $\sigma_{z\lambda}(a)$; *в* — зависимость касательных напряжений *max* $\tau_{xz\lambda}(a)$; *г* — зависимость перемещений $\delta(a)$

Примеры распределения напряжений у вершины трещины представлены на рис. 10, 11 при длине трещины a_0 = 30 мм.

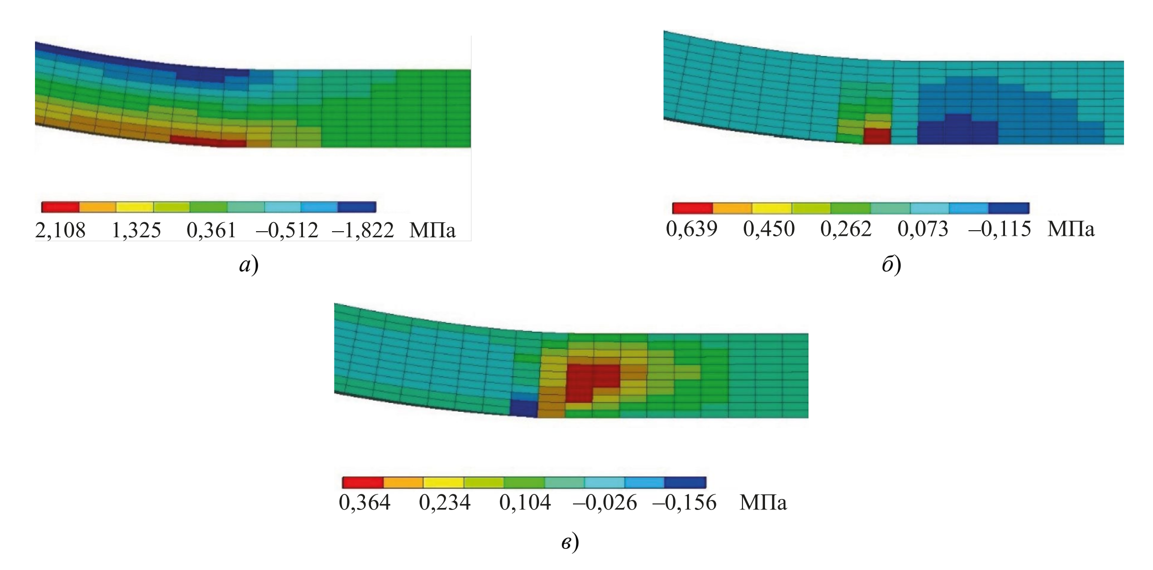


Рис. 10. Напряжения у вершины трещины при DCB-нагружении: *а* — нормальные напряжения $\sigma_{x\lambda}$; *б* — нормальные напряжения $\sigma_{z\lambda}$; *в* — касательные напряжения $\tau_{xz\lambda}$

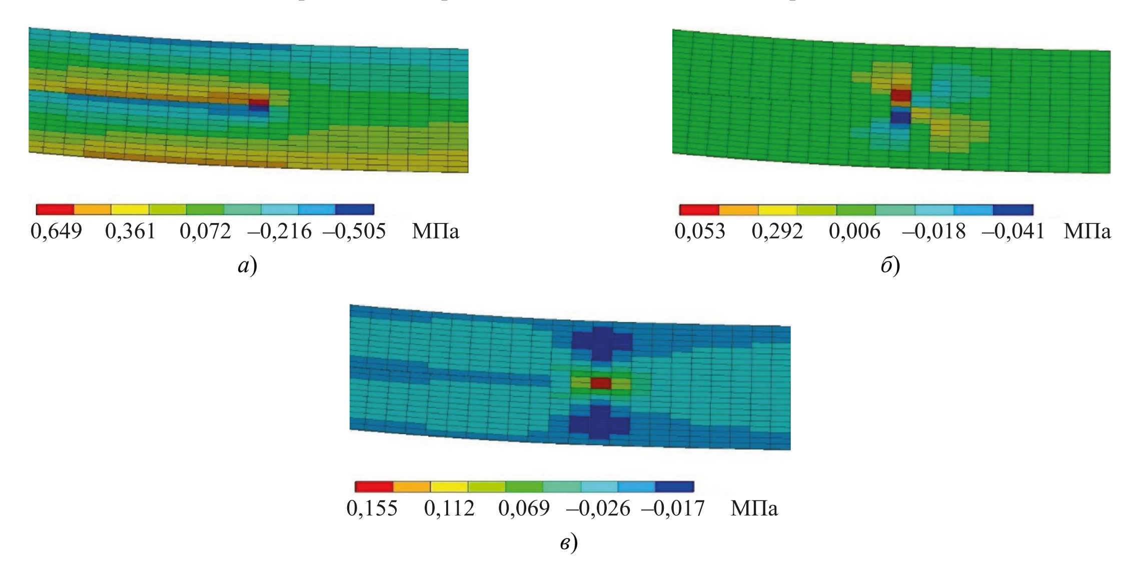


Рис. 11. Напряжения у вершины трещины при ENF-нагружении: *а* — нормальные напряжения $\sigma_{x\lambda}$; *б* — нормальные напряжения $\sigma_{z\lambda}$; *в* — касательные напряжения $\tau_{xz\lambda}$

Для получения расчетных зависимостей «нагрузка — перемещение» с помощью МКЭ учитываются характеристики прочности композита в главных направлениях, т.е. критерий (4). Представляет сложность прямое получение трансверсально-сдвиговых констант, поэтому ниже рассмотрен обратный метод. При таком подходе константы варьируются и выясняется их наилучшее сочетание. Это значит, что расчетные и экспериментальные диаграммы нагружения хорошо согласуются (среднеквадратичное отклонение перемещений при заданных нагрузках минимальное).

Результаты расчета при нагружении по схеме DCB сравнивали с экспериментом авторов, который рассмотрен в [16]. Образцы изготовили так же. Испытания провели в соответствии со стандартами ГОСТ Р 56815–2015[3] и ASTMD5528–14[4].

Расчет проводили для нагружения по схеме DCB. При расчете зависимости $P(\delta)$ для образцов без фелтинга нашли и округлили до целых значений следующие величины пределов прочности: Z_t = 39 МПа, X_t = 360 МПа, S = 82 МПа. Полученные значения 360 МПа и 39 МПа соответствуют данным по прочности стеклопластиков, указанным в [23]. Для образцов с фелтингом (плотность 10 см$^{-2}$) в расчетах получили значения X_t^* = 270 МПа,

[3] ГОСТ Р 56815–2015. *Композиты полимерные. Метод определения удельной работы расслоения в условиях отрыва.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200131393/titles (дата обращения 22.04.2024).

[4] ASTM D5528M–21. *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.* https://doi.org/10.1520/D5528_D5528M-21

Z_t* = 46 МПа и S* = 97 МПа. Таким образом, использование фелтинга позволило увеличить предел прочности на растяжение в направлении Z с 39 до 46 МПа (на ~18 %).

При нагружении по схеме DCB пределы прочности на сдвиг в плоскости XZ S и S* не вносят большой вклад в критерий (4), поэтому полученные в расчетах по схеме DCB значения S = 82 МПа и S* = 97 МПа нужно уточнить по схеме нагружения ENF. Отметим, что влияние нормальных напряжений в направлениях X и Z незначительно по сравнению с касательными напряжениями при нагружении по схеме ENF. Поэтому в расчетах при поиске значений S и S* величины Z_t, X_t, Z_t* и X_t* брали из решения обратной задачи при нагружении по схеме DCB.

Из условия наилучшей согласованности экспериментальных и расчетных кривых $P(\delta)$ (среднеквадратичное отклонение перемещений при заданных нагрузках минимальное) определили значения S = 77 МПа (без фелтинга) и S* = 89 МПа (с фелтингом). Как видим, фелтинг позволил увеличить предел прочности на сдвиг в плоскости XZ на ~16 %.

На рис. 12–13 приводятся экспериментальные диаграммы «нагрузка — перемещение», а также расчетные зависимости $P(\delta)$ при найденных значениях пределов прочности:

– Z_t = 39 МПа, X_t = 360 МПа, S = 77 МПа (для контрольных образцов без фелтинга);

– Z_t* = 46 МПа, X_t* = 270 МПа, S* = 89 МПа (для образцов с фелтингом).

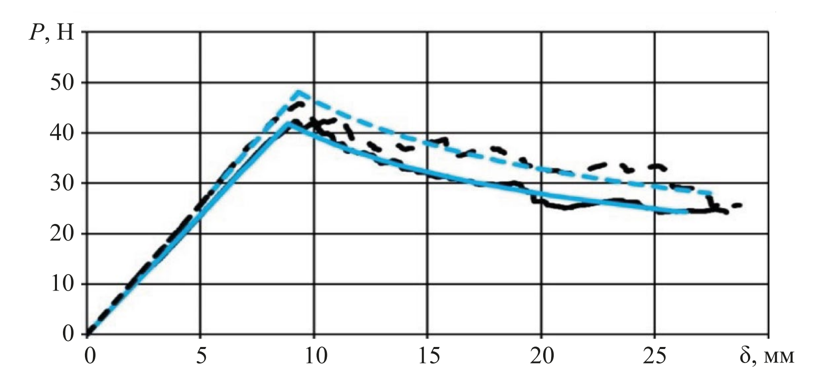


Рис. 12. Экспериментальные диаграммы «нагрузка — перемещение» [16] и расчетные зависимости $P(\delta)$: ▬ DCB-испытания образцов без фелтинга; ▬ расчет без фелтинга (Z_t = 39 МПа, X_t = 360 МПа, S = 77 МПа); - - - DCB-испытания образцов с фелтингом; - - - расчет с фелтингом (Z_t* = 46 МПа, X_t* = 270 МПа, S* = 89 МПа)

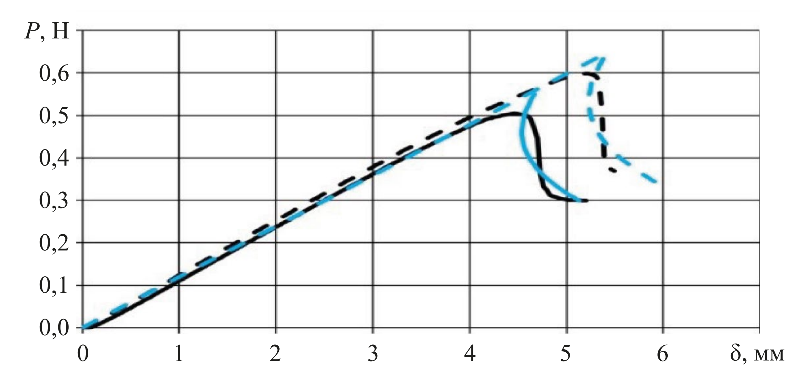


Рис. 13. Экспериментальные диаграммы «нагрузка — перемещение» и расчетные зависимости $P(\delta)$: ▬ ENF-испытания образцов без фелтинга; ▬ расчет без фелтинга (Z_t = 39 МПа, X_t = 360 МПа, S = 77 МПа); - - - ENF-испытания образцов с фелтингом; - - - расчет с фелтингом (Z_t* = 46 МПа, X_t* = 270 МПа, S* = 89 МПа)

Обсуждение и заключение. Исследования тканевого композита показали, что фелтинг плотностью 10 см$^{-2}$ увеличивает вязкость межслойного разрушения G_{IIc} на ~33 %.

С помощью МКЭ проанализировали напряженное состояние в квазистатической упругой постановке задачи и с использованием нелокальной теории прочности для разработанных численных моделей балки с трещинами известной длины. Особенностью расчетов было то, что в них не использовали контактные алгоритмы, а рассматривали лишь разрушение слоя композита, ближайшего к трещине, и соответствующее изменение площади склейки слоев. То есть трещина рассматривалась как концентратор напряжений. Критерий прочности композита, содержащий три параметра и записанный через осредненные напряжения, позволяет использовать метод пошагового продвижения трещины для прогнозирования кривой «нагрузка — перемещение».

Использование фелтинга плотностью 10 см$^{-2}$ увеличивает предел прочности на растяжение композита в направлении Z на ~18 %, а предел прочности на сдвиг в плоскости XZ — на ~16 %. Это стало известно из решения обратной задачи, т.е. поиска характеристик прочности материала по критерию (4) и кривой «нагрузка — перемещение».

Итоги представленного исследования найдут свое практическое применение. В частности, их можно использовать в задачах прогнозирования дефектов типа расслоений (например, при низкоскоростных ударах по композитам в обшивках летательных аппаратов). Результаты данной научной работы будут полезны для устранения указанных дефектов с помощью фелтинга.

Список литературы / References

1. Callister WD Jr., Rethwisch DG. *Materials Science and Engineering: An Introduction.* 10th edn. Hoboken, NJ: Wiley; 2018. 992 p. URL: https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering%3A+An+Introduction%2C+10th+Edition-p-9781119405498 (accessed: 22.04.2024).

2. Wei Tan, Falzon BG, Chiu LNS, Price M. Predicting Low Velocity Impact Damage and Compression-After-Impact (CAI) Behaviour of Composite Laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015;71:212–226. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.025

3. Balasubramani Veerappan, S Rajendra Boopathy. Prediction of Residual Tensile Strength of Laminated Composite Plates after Low Velocity Impact. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014;9(3):320–325.

4. Abrate S. *Impact on Composite Structures*. Cambridge: Cambridge University Press; 2009. 289 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511574504

5. Liyong Tong, Mouritz AP, Bannister MK. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites.* Amsterdam: Elsevier Science; 2002. 254 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-043938-9.X5012-1

6. Jinlian Hu. *3-D Fibrous Assemblies: Properties, Applications and Modeling of Three-Dimensional Textile Structures.* Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing; 2008. 280 p.

7. Chen Xiaoming, Zhao Yufen, Zhang Chunyan, Wang Xiaoxu, Chen Li. Robot Needle-Punching for Manufacturing Composite Performs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;50:132–139. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.09.008

8. Forental GA, Kheruvimov AV, Nikonov AV, Sapozhnikov SB. Stack Fabric Felting to Get PCM G_{IIc} Improvement and LVI Tolerance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1024(1):012001. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1024/1/012001

9. Sham MS, Venkatesha CS, Jayaraju T. Experimental Methods of Determining Fracture Toughness of Fiber Reinforced Polymer Composites under Various Loading Conditions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2011;10(13):1263–1275. http://doi.org/10.4236/jmmce.2011.1013099

10. Pinho S, Robinson P, Iannucci L. Developing a Four Point Bend Specimen to Measure the Mode I Intralaminar Fracture Toughness of Unidirectional Laminated Composites. *Composites Science and Technology*. 2009;69(7–8):1303–1309. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.03.007

11. Issam Tawk, Jihad Rishmany, Nicolas Saba, Pablo Navarro, Jean-Francois Ferrero. Experimental Study of the Interlaminar Fracture of Composite Materials in Mode III by MSCB Test. *Composite Structures*. 2020;233:111548. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111548

12. Hossein Saidpour, Mehdi Barikani, Multu Sezen. Mode-II Interlaminar Fracture Toughness of Carbon/Epoxy Laminates. *Iranian Polymer Journal.* 2003;12(5):389–400.

13. Sham Prasad MS, Venkatesha CS, Jayaraju T. Experimental Methods of Determining Fracture Toughness of Fiber Reinforced Polymer Composites under Various Loading Conditions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2011;10(13):1263–1275. http://doi.org/10.4236/jmmce.2011.1013099

14. Ying Zeng, Hong-Yuan Liu, Yiu-Wing Mai, Xu-Sheng Du. Improving Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fibre/Epoxy Laminates by Incorporation of Nano-Particles. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(1):90–94. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.036

15. Kadhum A, Muslim ZR, Jaffer HI. Interlaminar Fracture of Micro and Nano Composites Special. *Acta Physica Polonica: Series A*. 2019;135(5):1126–1128. http://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.1126

16. Форенталь Г.А., Сапожников С.Б. Перспективы технологии фелтинга для локального трехмерного армирования полимерных тканевых композитов. *Композиты и наноструктуры*. 2022;14(4):233–245. https://doi.org/10.36236/1999-7590-2022-14-4-233-245233

Forental GA, Sapozhnikov SB. Prospects of Felting Technology for Local 3D-Reinforcement of Polymer Fabric Composites. *Composites and Nanostructures*. 2022;14(56):233–245. https://doi.org/36.10236/1999-7590-2022-14-4-233-245233

17. Maimi P, Gonzalez EV, Gascons N, Ripoll L. Size Effect Law and Critical Distance Theories to Predict the Nominal Strength of Quasibrittle Structures. *Applied Mechanics Reviews*. 2013;65(2):020803. https://doi.org/10.1115/1.4024163

18. Hoang Thai Nguyen, A Abdullah Dönmez, Zdenek P Bazant. Structural Strength Scaling Law for Fracture of Plastic-Hardening Metals and Testing of Fracture Properties. *Extreme Mechanics Letters*. 2021;43(1):101141. https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.101141

19. Taylor D. *The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics*. Amsterdam: Elsevier Science; 2007. 306 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044478-9.X5000-5

20. Mahmoodi MJ, Khamehchi M. Finite Element Analysis of Free Corner Effects in Composite Laminates Based on a Global–Local Model. *Archive of Applied Mechanics*. 2023;93(12):4327–4350. http://doi.org/10.1007/s00419-023-02494-1

21. Jaehong Lee, Zafer Gurdal, O Hayden Griffin Jr. Layer-Wise Approach for the Bifurcation Problem in Laminated Composites with Delaminations. *AIAA Journal*. 1993;31(2):331–338. https://doi.org/10.2514/3.11672

22. Сапожников С.Б. Разрушение тканевых композитов с концентраторами напряжений: учет неупругого деформирования в численном моделировании. *Композиты и наноструктуры*. 2020;2(46):31–39. https://doi.org/10.36236/1999-7590-2020-12-2-31-39

Sapozhnikov SB. Failure of Fabric Reinforced Composite with Concentrators: Implementation of Inelastic Deformation in Numerical Simulation. *Composites and Nanostructures*. 2020;12(45):31–39. https://doi.org/10.36236/1999-7590-2020-12-2-31-39

23. Barbero EJ. *Introduction to Composite Materials Design*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2011. 562 p. https://doi.org/10.1201/9781439894132

Об авторах:

Галина Анатольевна Форенталь, инженер-исследователь Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), SPIN-код, ORCID, ScopusID, gforental@mail.ru

Сергей Борисович Сапожников, доктор технических наук, профессор Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), ведущий ученый Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (140180, Российская Федерация, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, sapozhnikovsb@susu.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.А. Форенталь: проведение экспериментов и расчетов, анализ результатов исследований, формулирование выводов, подготовка текста статьи, оформление статьи.

С.Б. Сапожников: научное руководство, корректировка текста статьи.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina A. Forental, Research Engineer, South Ural State University (76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, gforental@mail.ru

Sergey B. Sapozhnikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Engineering Mechanics Department, South Ural State University (76, Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), Leading Scientist, Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (1, Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, sapozhnikovsb@susu.ru

Claimed Contributorship:

GA Forental: conducting experiments and calculations, analysis of the research results, formulation of conclusions, text preparation, layout of the paper.

SB Sapozhnikov: academic advising, revision of the text.

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 27.06.2024
Принята к публикации / Accepted 05.07.2024

МЕХАНИКА
MECHANICS





УДК 539.42, 539.375

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование процессов эволюции дефектов структуры мелкозернистых бетонов методами компьютерной томографии



EDN: AICZHY

А.В. Пузатова ✉, **М.А. Дмитриева**, **А.О. Товпинец**, **В.Н. Лейцин**

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Российская Федерация

✉ a.v.puzatova@gmail.com

Аннотация

Введение. При изучении композиционных материалов строительного назначения актуальными являются исследования механизмов формирования структуры и свойств современных бетонов в процессе набора прочности. В исследованиях современных композиционных материалов на цементном вяжущем отсутствуют сведения о развитии дефектов структуры и разрушении материала на начальных сроках набора прочности. Такие сведения можно получить с помощью рентгеновской компьютерной томографии — перспективного метода неразрушающего контроля состояния материала. Поэтому целью данной работы явилось изучение образования и распространения трещин в образцах мелкозернистого бетона с различным фракционным составом песка вследствие естественных процессов усадки цементного камня, а также механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона при приложении сжимающей нагрузки на ранних сроках набора прочности.

Материалы и методы. В исследовании использовались мелкозернистые бетонные смеси трех композиций с различным гранулометрическим составом песка. Образцы для томографии были изготовлены путем помещения свежих смесей в полимерные цилиндрические контейнеры. Томография образцов сразу после изготовления, а также через 8 и 51 сутки проводилась в микрофокусной рентгеновской установке YXLON Cheetah. Состав с двухфракционным песком был модифицирован механической активацией компонентов, изготовлены образцы-кубики 20×20×20 мм. Далее на установке Instron проведены испытания на сжатие через 3 и 7,5 часов и затем — томография разрушенных образцов.

Результаты исследования. Установлено, что разрушение контактных зон зависит от отношения размеров фракций. В присутствии большого количества крупных частиц песка в теле бетона разрушение контактных зон более выражено и имеет магистральный характер. При использовании мелкого или полифракционного песка контактные зоны разрушаются локально и имеют визуально меньшую площадь. На изображениях разрушенного модифицированного образца, испытанного через три часа после изготовления, прослеживаются четкие трещины и выколы на гранях, что говорит об упруго-пластическом характере разрушения. Через 7,5 часов грани образца при разрушении покрываются сеткой мелких трещин, внутри образца также образуется множество трещин и микротрещин, что свидетельствует о хрупком разрушении. По полученным изображениям деформированной структуры модифицированного бетона наглядно прослеживается механизм перехода от упруго-пластического разрушения материала к хрупкому.

Обсуждение и заключение. Изученные зависимости влияния размеров мелкого заполнителя на механизмы образования и распространения дефектов структуры вносят вклад в теорию процессов разрушения мелкозернистых бетонов. Полученные результаты доказывают перспективность применения рентгеновской компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля внутренней структуры мелкозернистого бетона, в том числе на ранних сроках набора прочности.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, мелкозернистый бетон, деформация, упруго-пластическое разрушение, хрупкое разрушение

Благодарности. Авторы выражают благодарность Шиняевой Марии Владимировне, Когай Алине Дмитриевне за помощь в приготовлении образцов композиционных материалов для проведения исследований структуры на рентгеновском компьютерном томографе.

Для цитирования. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Товпинец А.О., Лейцин В.Н. Исследование процессов эволюции дефектов структуры мелкозернистых бетонов методами компьютерной томографии. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Original Empirical Research

Study of Structural Defects Evolution in Fine-Grained Concrete Using Computed Tomography Methods

Anastasiia V. Puzatova ✉, **Maria A. Dmitrieva** , **Alexandr O. Tovpinets** , **Vladimir V. Leitsin**
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation
✉ a.v.puzatova@gmail.com

Abstract

Introduction. When studying composite materials for construction purposes, it is needed to consider the mechanisms of formation of the structure and properties of modern concretes in the process of strength development. In studies of modern composite materials based on cement binder, there is no information about the development of structural defects and destruction of the material at the initial stages of strength development. This information can be obtained using X-ray computed tomography, a promising method of nondestructive testing of the state of the material. Therefore, the objective of this work was to study the formation and propagation of cracks in samples of fine-grained concrete with different fractional composition of sand due to natural processes of cement shrinkage, as well as the mechanics of destruction of samples of modified fine-grained concrete when applying a compressive load at the early stages of strength development.

Materials and Methods. The study used fine-grained concrete mixtures of three compositions with different sand gradation. The tomography samples were made by placing fresh mixtures in polymer cylindrical containers. Tomography of the samples immediately after manufacture, as well as after 8 and 51 days, was performed in a YXLON Cheetah microfocus X-ray machine. The composition with two-fraction sand was modified by mechanical activation of the components, 20×20×20 mm cube samples were made. Further, compression tests were performed at the Instron installation after 3 and 7.5 hours, and then — tomography of the destroyed samples.

Results. It was established that the destruction of contact zones depended on the ratio of the size of the fractions. In the presence of a bulk of coarse sand grains in concrete, the destruction of contact zones was more pronounced and had a main mode. When using fine or polyfraction sand, contact zones were destroyed locally and had a visually smaller area. The images of the destroyed modified sample, tested 3 hours after manufacturing, showed clear cracks and indents on the edges, which indicated the elastic-plastic nature of the destruction. In 7.5 hours, the edges of the sample upon destruction were covered with a network of small cracks; inside the sample there were also numerous cracks and microcracks, which indicated brittle fracture. Based on the obtained images of the deformed structure of modified concrete, the mechanism of transition from elastic-plastic destruction of the material to brittle one was clearly visible.

Discussion and Conclusion. The studied dependences of the influence of the size of fine aggregate on the mechanisms of formation and propagation of structural defects contribute to the theory of the processes of destruction of fine-grained concretes. The results obtained prove the prospects of using X-ray computed tomography as a method of nondestructive testing of the internal structure of fine-grained concrete, including at the early stages of strength development.

Keywords: X-ray computed tomography, fine-grained concrete, deformation, elastic-plastic failure, brittle fracture

Acknowledgements. The authors would like to thank Maria Vladimirovna Shiryaeva, Alina Dmitrievna Kogai for their help in preparing samples of composite materials for conducting structural studies on an X-ray computed tomograph.

For Citation. Puzatova AV, Dmitrieva MA, Tovpinets AO, Leitsin VN. Study of Structural Defects Evolution in Fine-Grained Concrete Using Computed Tomography Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237

Введение. Рентгеновская компьютерная томография — перспективный метод неразрушающего контроля состояния материала. В бетонной промышленности томография пригодна для определения структуры образцов бетона, микротрещин, внутренних разрушений, исследования распределения пор и частиц заполнителя. Рентгеновская компьютерная томография обеспечивает построение модели микроструктуры цементной пасты, позволяет исследовать развитие процессов гидратации цемента [1, 2], строить прогнозы формирования механических характеристик и условий разрушения [3, 4]. Компьютерная томография активно используется для изучения средней

плотности и пористости высокопрочных легких бетонов [5], исследования структуры конструкционно-теплоизоляционного бетона [6], построения мезомасштабной 3D-модели пенобетона [7], образования и распределения пор в легком бетоне [8], анализа микроструктурных характеристик образцов бетона с различными заполнителями [9, 10], разработки трехмерных мезомасштабных моделей для построения сетки конечных элементов при моделировании структуры бетона [11, 12]. В сравнении со стандартными 2D методами рентгенографии, построение 3D-моделей образцов многокомпонентных бетонов являются перспективными для исследования фундаментальных механизмов формирования структуры и свойств современных бетонов.

Наиболее уязвимым участком мелкозернистых бетонов при нагружении является контактная зона — участки контакта цементного камня и заполнителей. При воздействии внешних нагрузок именно с этих участков начинается формирование микродефектов и микротрещин, развитие которых ведет к образованию дефектов на макроуровне, что может привести к потере несущей способности и разрушению конструкции. Разрушение контактных зон происходит из-за различия характеристик граничащих компонентов (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициента линейного термического расширения, размеров контактирующих фаз, микродефектов на поверхности раздела фаз) [13]. Метод рентгеновской компьютерной томографии перспективен для изучения эволюции контактных зон, в том числе на ранних стадиях гидратации, так как позволяет изучать структуру без разрушения образца непосредственно в процессе твердения. Контактные зоны, как правило, имеют более высокую пористость и низкую прочность, вследствие чего именно в этих зонах образуются трещины [4]. На прочность контактных зон также влияет размер заполнителя. Установлено, что в бетонах с комбинированными заполнителями (крупной фракции и дроблеными) формируются однородные и более прочные контактные зоны [14]. Имеется множество современных исследований формирования контактных зон цементного камня с арматурой [15], трещин в крупнопористом бетоне [16], дефектов на границе контакта цементно-песчаного раствора с крупным заполнителем [17], но, наряду с этим, формирование контактных зон в мелкозернистых бетонах с различной крупностью и плотностью упаковки зерен песка слабо изучено. В современной научной литературе отсутствует описание влияния размера мелкого заполнителя на формирование дефектов контактных зон в мелкозернистых бетонах. Таким образом, изучение образования дефектов структуры мелкозернистого бетона, содержащего песок различного фракционного состава, с получением наглядной картины распространения трещин методом рентгеновской компьютерной томографии является актуальным.

Для снижения напряжений, возникающих в контактных зонах, используются микронаполнители, схожие по своим свойствам с цементным камнем. Такие наполнители, имеющие повышенную удельную поверхность, создают дополнительные контактные зоны, между которыми перераспределяются напряжения, возникающие вследствие твердения вяжущего. Упрочнения контактных зон можно добиться введением механоактивированных компонентов в бетонную смесь [13]. Механическая активация отдельных компонентов способствует формированию более плотной структуры, приданию однородности составу, развитию начальной прочности вследствие ускорения реакции гидратации и роста кристаллогидратов цементного камня, а также сокращению сроков схватывания [18, 19]. Развитие дефектов структуры в мелкозернистых бетонах, модифицированных механической активацией компонентов, также слабо изучено. Среди современных научных исследований крайне мало работ, посвященных исследованию процессов распространения трещин в модифицированной структуре мелкозернистых бетонов на начальных сроках набора прочности. Следовательно, применение метода компьютерной томографии для изучения механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона на начальных сроках твердения является актуальным.

Целью данной работы являлось изучение образования и распространения трещин в образцах мелкозернистого бетона с различным фракционным составом песка вследствие естественных процессов усадки цементного камня, а также механики разрушения образцов модифицированного мелкозернистого бетона при приложении сжимающей нагрузки на ранних сроках набора прочности.

Материалы и методы. В исследовании по определению дефектов контактных зон мелкозернистых бетонов с различным гранулометрическим составом песка использовались три образца мелкозернистой бетонной смеси следующих составов:

– состав № 1: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок монофракционный (фракция 0,63–0,315 мм); вода. Соотношение компонентов смеси — 1:2,56:0,67;

– состав № 2: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок полифракционный строительный по ГОСТ 8736–2014 с МК = 1,85; вода. Соотношение компонентов смеси — 1:2,56:0,67;

– состав № 3: портландцемент Евроцем 500 супер; ЦЕМ I 42.5 Н (ООО «Петербург цемент»); песок двухфракционный (фракция 2,5–1,25 мм — 80 % от общей массы песка, фракция 0,63–0,315 мм — 20 % от общей массы песка; отсутствует промежуточная фракция 1,25–0,63 мм); высокоактивный метакаолин (белый) (производства ГК «Синерго», Челябинская область); микрокремнезем; вода. Соотношение компонентов смеси — 1:1,75:0,43:0,23:0,15:0,67.

Свежезамешанные составы мелкозернистой бетонной смеси были помещены в полимерный цилиндрический контейнер диаметром 8 мм и длиной около 70 мм. Диаметр контейнера был определен в соответствии с размером исходных компонентов мелкозернистого бетона указанных ранее составов на основе условий представительности [20] и репрезентативности исследуемого объема. Для отслеживания изменений структуры в процессе гидратации цемента и усадки цементного камня, томография образцов была сделала сразу после смешивания компонентов и спустя 8 суток твердения. За конечный результат приняты образцы в возрасте 51 суток.

В исследовании по эволюции механизма образования трещин в процессе разрушения образцов под действием внешней сжимающей силы использовался состав № 3 с двухфракционным песком, модифицированный путем механической активации композиции цемента и песка. Механическая активация компонентов (цемента и песка) проводилась с использованием высокоскоростной шаровой мельницы Retsch EMax. Измельчение компонентов происходило при скорости вращения чаш аппарата 750 об/мин в течение 5 минут.

Из бетонных растворов были изготовлены образцы кубической формы размерами 20×20×20 мм, к которым была приложена внешняя сжимающая нагрузка через 3 и 7,5 часов. После приложения нагрузки были сделаны томографии разрушенных образцов с целью прослеживания эволюции характера разрушения материала.

Структура образцов бетона была изучена с использованием микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа YXLON Cheetah с конфигурацией Y. Cheetah. Характеристики прибора указаны в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики томографа YXLON Cheetah

Характеристика	Значение
Рентгеновская трубка	Открытого типа
Диапазон рабочих напряжений, кВ	25–160
Диапазон рабочих токов, мА	0,1–1
Максимальная мощность трубки, Вт	64
Максимальная мощность трубки на мишени, Вт	15
Угол наклона детектора	±70° (сектор 140°)
Увеличение (геометрическое/максимальное)	2000x / 17500x
Максимальные размеры образца, мм	800×500
Время от загрузки образца до получения первого изображения, сек	<10
Время полноценной томографии образца, сек	7
Время послойного исследования образца, сек	20
Габаритные размеры, мм	1650×1400×1850
Масса, кг	2200

С позиции микромеханики композиционных материалов оценка эффективных характеристик может быть представлена наборами свойств представительного объема исследуемого тела. Исследуемый образец для томографии должен отвечать представительному объему материала, который имеет смысл элементарного макрообъема микронеоднородной среды.

Во время эксперимента, после прохождении рентгеновских лучей через образец получается набор плоских рентгеновских изображений с неравномерным распределением серости на снимках. Это связано с неравномерным поглощением рентгена компонентами исследуемого материала — наличием пор, дефектов, плотных включений и пр. После реконструкции 3D изображений образца градиент серости инвертирован относительно обычных рентгеновских снимков: материалам, наиболее прозрачным для рентгеновских лучей, например, порам, соответствует черный цвет, а максимально плотному материалу — белый. Плотность серости в полноцветном представлении рассматривается в диапазоне 0–255, где 0 — отвечает черному цвету, а 255 — белому. Данный алгоритм служит для определения минимального размера признаков, которые можно было бы дифференцировать как структурные компоненты исследуемого образца: пористость, цементный раствор и заполнитель в объеме. Далее с помощью данной градации серости, выделяя те или иные числовые диапазоны, можно анализировать отдельную внутреннюю структуру, распределение компонентов и пористости [21].

Параметры съемки для всех исследуемых образцов оставались постоянными: напряжение — 85 кВт; ток — 45 μA; приближение — 8,9; угол сканирования — 360°. Результаты съемки представляют собой 1024 последовательных изображения внутренней структуры образцов. Дальнейшая обработка полученного массива двумерных изображений происходила в программе «Volume Graphics Studio». Для улучшения визуализации включений была проведена работа по редактированию послойных изображений по уровням яркости и контрастности. Итогом томографии явилась 3D-модель образца и трех его проекций с возможностью изучения внутренней структуры в любом сечении.

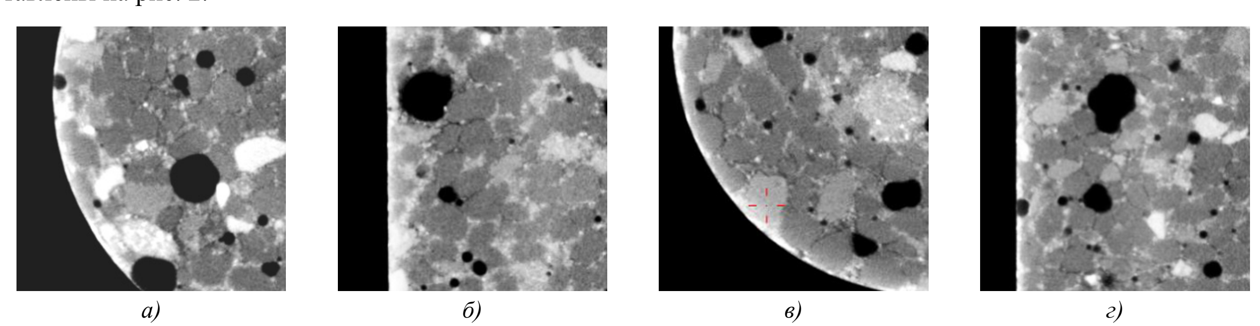
Результаты исследования. Изображения внутренней структуры образцов состава № 1 с монофракционным песком (фракция 0,63–0,315 мм) в возрасте 0,8 и 51 суток, полученные с помощью рентгеновской томографии, представлены на рис. 1. Наименьшей плотностью обладают самые темные участки на изображениях, в данном случае — поры. Наиболее твердые частицы соответствуют самым светлым участкам.

а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 1. Внутренняя структура образца № 1 (монофракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в, е* — в возрасте 51 сут.

На изображениях внутренней структуры образца состава № 1 с монофракционным песком сразу после замешивания смеси не отмечается изменений в контактных зонах. К 8 и 51 суткам твердения вокруг отдельных зерен песка просматриваются полоски темного цвета (указаны красными стрелками), соответствующие пустотам, которые образуются вследствие усадки цементного камня. Причем с ростом возраста бетона таких пустот вокруг зерен песка визуально становится больше. Увеличенные изображения отдельных трещинообразных пустот представлены на рис. 2.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Увеличенные фрагменты рис. 1:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3; *г* — фрагмент 4

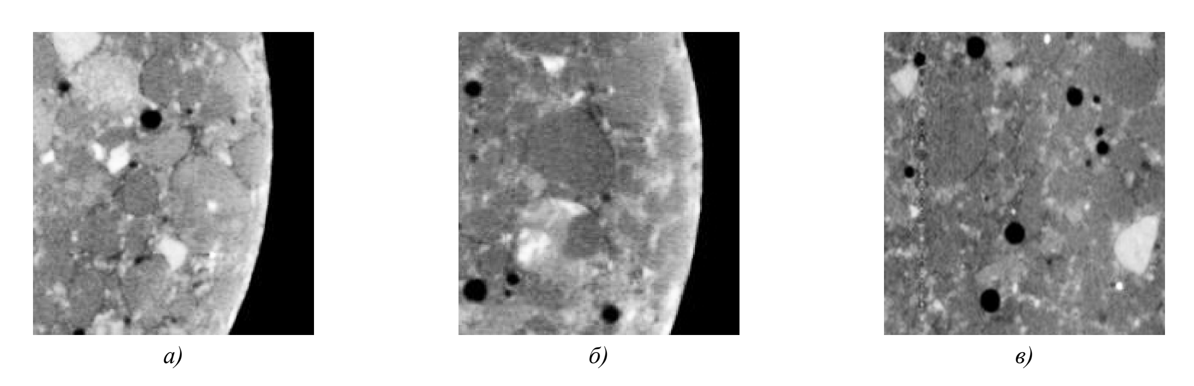
На фрагментах 3 и 4, соответствующих образцу № 1 в 51 суточном возрасте, характер проявления дефектов контактных зон вокруг частиц песка наиболее выраженный. Это подтверждается тем, что к 51 суткам процесс усадки цементного камня практически завершен, тогда как в возрасте 8 суток усадка находится в активной фазе.

Изображения внутренней структуры образцов состава № 2 с полифракционным песком в возрасте 0, 8 и 51 суток представлены на рис. 3. Отдельные увеличенные фрагменты представлены на рис. 4.

2 мм — *а)* | 2 мм — *б)* | 2 мм — *в)*

2 мм — *г)* | 2 мм — *д)* | 2 мм — *е)*

Рис. 3. Внутренняя структура образца № 2 (полифракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в, е* — в возрасте 51 сут.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Увеличенные фрагменты рис. 3:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3

Развитие дефектов контактных зон образцов состава № 2 с полифракционным заполнителем так же, как у состава № 1 с монофракционным, проявляется к 8 суткам твердения, количество дефектных участков увеличивается к 51 суткам. Можно отметить, что разрушения контактных зон вокруг отдельных крупных частиц песка не наблюдается.

Изображения внутренней структуры образцов состава № 3 с двухфракционным песком (фракции 2,5–1,25 мм и 0,63–0,315 мм, отсутствует промежуточная фракция) в возрасте 0, 8 и 51 дня представлены на рис. 5.

2 мм   2 мм   2 мм

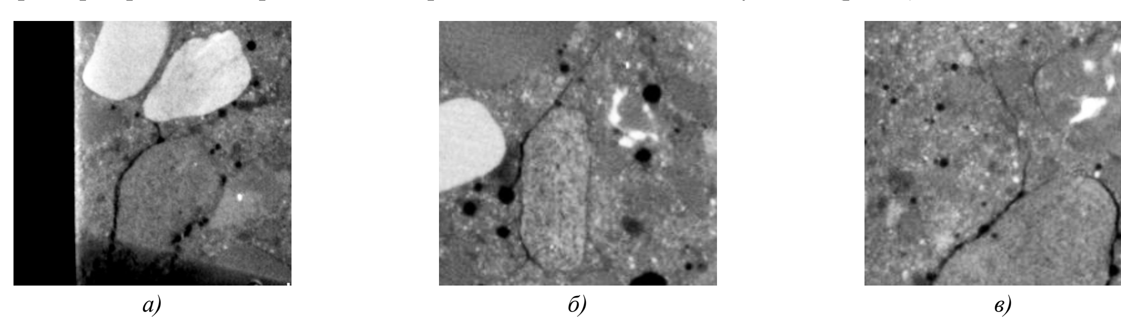
а)   *б)*   *в)*

2 мм   2 мм   2 мм

г)   *д)*   *е)*

Рис. 5. Внутренняя структура образца № 3 (двухфракционный песок):
а, г — сразу после приготовления; *б, д* — в возрасте 8 сут.; *в*, *е* — в возрасте 51 сут.

На изображениях внутренней структуры образцов, содержащих две фракции песка, в возрасте 8 и 51 суток наблюдается отчетливое образование трещин вокруг крупных зерен песка, причем прослеживается магистральный характер образования трещин, когда трещины соединяются между собой (рис. 6).



а)   *б)*   *в)*

Рис. 6. Увеличенные фрагменты рис. 5:
а — фрагмент 1; *б* — фрагмент 2; *в* — фрагмент 3

Образование магистральных трещин вблизи крупных зерен песка свидетельствует о том, что контактные зоны вокруг крупных частиц заполнителя наиболее напряжены и подвержены разрушению в процессе усадки цементного камня.

По полученным изображениям внутренней структуры образцов с различной крупностью песка можно заключить, что развитие дефектов контактных зон вследствие усадки цементного камня зависит от соотношения размеров фракций. В образцах с моно- и полифракционным песком дефектная структура развивается локально, площадь таких дефектов визуально намного меньше, чем в образцах с двумя различными по размеру фракциями. В присутствии крупной фракции песка высокой объемной концентрации дефекты контактных зон развиваются вблизи крупных зерен и имеют магистральный характер.

Образцы-кубики состава № 3 с двухфракционным песком, модифицированные механической активацией отдельных компонентов, были подвержены приложению внешней сжимающей нагрузки в возрасте 3 и 7,5 часов после приготовления. Изображения деформированной внутренней структуры образцов представлены на рис. 7.

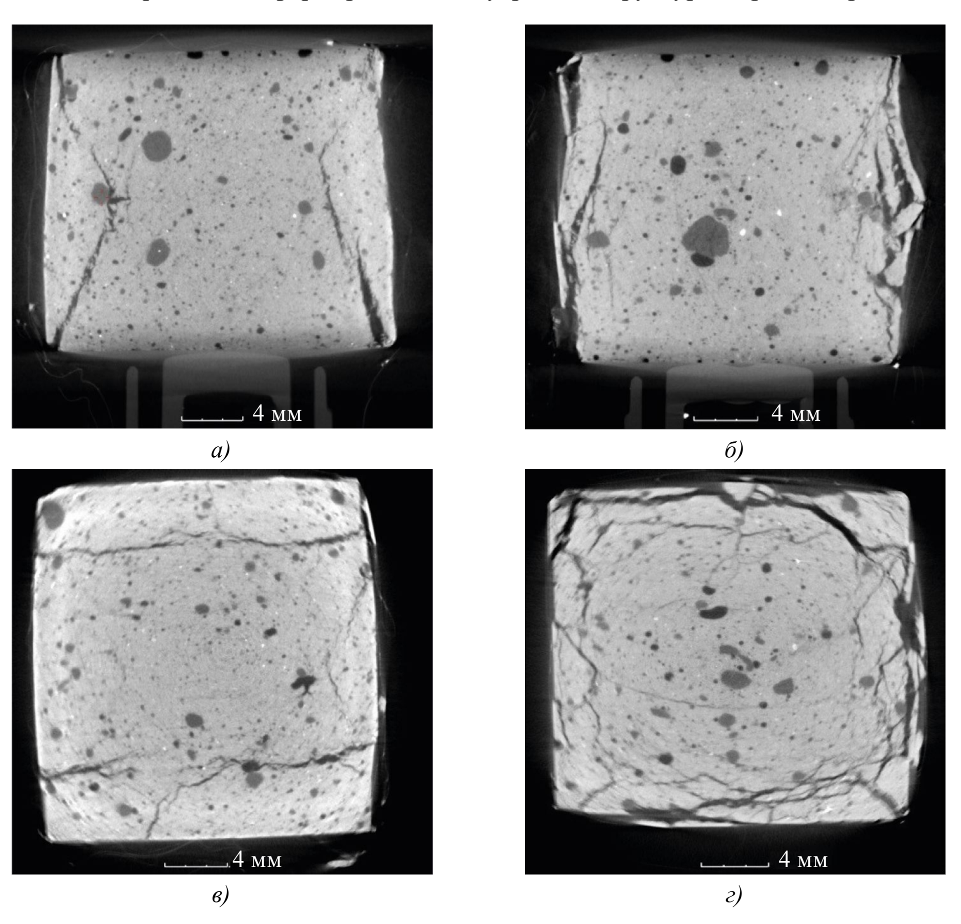


Рис. 7. Изображения внутренней структуры модифицированных образцов:
а — фронтальное сечение в возрасте 3 часов; *б* — фронтальное сечение в возрасте 7,5 часов;
в — горизонтальное сечение в возрасте 3 часов; *г* — горизонтальное сечение в возрасте 7,5 часов

На изображениях наблюдается эволюция от упруго-пластического к хрупкому разрушению образцов твердеющего бетона. Образцы, испытанные через 3 часа после изготовления, имеют упруго-пластический характер разрушения, прослеживаются четкие трещины и выколы на гранях образца. В возрасте 7,5 часов грани образца при разрушении покрываются сеткой мелких трещин, внутри образца также имеется множество трещин и микротрещин, что свидетельствует о хрупком разрушении.

Обсуждение и заключение. Посредством механических испытаний и рентгеновской компьютерной томографии имеется возможность отслеживания процессов разрушения в структуре мелкозернистого бетона. Полученные результаты дают развитие новому комплексному методу оценки структурных характеристик модифицированного мелкозернистого бетона на всех этапах набора прочности. Установлено, что разрушение контактных зон зависит от отношения размеров фракций. В присутствии большого количества крупных частиц песка в теле бетона разрушение контактных зон более выражено и имеет магистральный характер. При использовании мелкого или полифракционного песка контактные зоны разрушаются локально и имеют визуально меньшую площадь. Это свидетельствует о том, что контактные зоны вблизи крупных частиц заполнителя наиболее напряжены и в первую очередь подвержены разрушению в процессе усадки цементного камня.

Изученные зависимости влияния размеров мелкого заполнителя на механизмы образования и распространения дефектов структуры вносят вклад в теорию процессов разрушения мелкозернистых бетонов. Полученные результаты доказывают перспективность применения рентгеновской компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля внутренней структуры мелкозернистого бетона, в том числе на ранних сроках набора прочности. Компьютерная томография, наряду с традиционными методами исследования структуры и свойств строительных материалов, дает развитие новому комплексному методу, позволяющему изучать современные многокомпонентные бетоны на всех стадиях набора прочности, механизмы образования и развития дефектов структуры ввиду естественных процессов изменения состояния материала и при различных режимах внешнего нагружения.

Список литературы / References

1. Дмитриева М.А., Когай А.Д., Лейцин В.Н., Товпинец А.О., Шиняева М.В. Экспериментально-теоретический подход оценки структуры мелкозернистых модифицированных бетонов. *Вестник МГСУ*. 2023;18(1):70–81. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.70-81

Dmitrieva MA, Kogai AD, Leitsin VN, Tovpinets AO, Shinyaeva MV. An Experimental and Theoretical Approach to Assessing the Structure of Fine-Grained Modified Concretes. *Vestnik MGSU*. 2023;18(1):70–81. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.70-81

2. Дмитриева М.А., Шаранова А.В., Лейцин В.Н., Шиняева М.В. Экспериментальные исследования эволюции структурно-механических характеристик цементного камня в процессе гидратации. В: *Труды III Международной конференции «Современные строительные материалы и технологии»*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2021. С. 7–13.

Dmitrieva MA, Sharanova AV, Leitsin VN, Shinyaeva MV. Experimental Studies of the Evolution of Structural and Mechanical Characteristics of Cement Stone in the Process of Hydration. In: *Proc. III International Conference "Advanced Building Materials and Technologies"*. Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2021. P. 7–13. (In Russ.)

3. Mingzhong Zhang, Jivkov AP. Micromechanical Modelling of Deformation and Fracture of Hydrating Cement Paste Using X-ray Computed Tomography Characterization. *Composites Part B: Engineering*. 2016;88:64–72. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.007

4. Lavrov A, Panduro EAC, Torsæter M. Synchrotron Study of Cement Hydration: Towards Computed Tomography Analysis of Interfacial Transition Zone. *Energy Procedia*. 2017;114:5109–5117. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1666

5. Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов. *Инженерно-строительный журнал*. 2014;51(7):31–37. https://doi.org/10.5862/MCE.51.4

Inozemtsev AS. Average Density and Porosity of High-Strength Lightweight Concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;51(7):31–37. (In Russ.) https://doi.org/10.5862/MCE.51.4

6. Осипов С.П., Прищепа И.А., Кудяков А.И., Батранин А.В., Осипов О.С. Компьютерная томография пенобетона. *Системы. Методы. Технологии.* 2018;38(2):146–152. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

Osipov SP, Prishchepa IA, Kudyakov AI, Batranin AV, Osipov OS. Computer Tomography of Foam Concrete. *Systems. Methods. Technologies.* 2018;38(2):146–152. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

7. Tuan Nguyen, Abdallah Ghazlan, Alireza Kashani, Stéphane Bordas, Tuan Ngo. 3D Meso-Scale Modelling of Foamed Concrete Based on X-ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*. 2018;188:583–598. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.085

8. Haizhu Lu, Eugene Alymov, Sanjay Shah, Karl Peterson. Measurement of Air Void System in Lightweight Concrete by X-ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*. 2017;152:467–483. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.180

9. Хузин А.Ф., Рахимов Р.З. Влияние многослойных углеродных нанотрубок на пористость цементного камня. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016;37(3):231–237.

Khuzin AF, Rahimov RZ. The Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Porosity of the Cement Stone. *News KSUAE*. 2016;37(3):231–237.

10. Sang-Yeop Chung, Mohamed Abd Elrahman, Dietmar Stephan, Paul H Kamm. The Influence of Different Concrete Additions on the Properties of Lightweight Concrete Evaluated Using Experimental and Numerical Approaches. *Construction and Building Materials*. 2018;189:314–322. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.189

11. Yujie Huang, Zhenjun Yang, Wenyuan Ren, Guohua Liu, Chuanzeng Zhang. 3D Meso-Scale Fracture Modelling and Validation of Concrete Based on In-situ X-ray Computed Tomography Images Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;67–68:340–352. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.05.002

12. Левандовский А.Н., Мельников Б.Е., Шамкин А.А. Моделирование пористого материала методом конечных элементов. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017;53(2):61–77. https://doi.org/10.18720/CUBS.53.5

Levandovskiy AN, Melnikov BE, Shamkin AA. Porous Material Modeling with Finite Element Method. *Construction of Unique Buildings and Structures.* 2017;53(2):61–77. https://doi.org/10.18720/CUBS.53.5

13. Большаков В.И., Елисеева М.А., Щербак С.А. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков. *Наука та прогрес транспорту.* 2014;53(5):138–149.

Bolshakov VI, Yelisieieva MO, Shcherbak SA. Contact Strength of Mechanoactivated Fine Concretes from Granulated Blast-Furnace Slags. *Nauka ta progres transportu*. 2014;53(5):138–149. (In Russ.)

14. Егорочкина И.О., Серебряная И.А., Шляхова Е.А., Матросов А.А., Пронина К.А., Кузина А.Н. Исследование структуры контактной зоны в бетонах с комбинированными заполнителями. *Инженерный вестник Дона*. 2019;55(4):40.

Egorochkina IO, Serebryanaya IA, Shlyakhova EA, Matrosov AA, Pronina KA, Kuzina AN. Study of the Structure of the Contact Zone in Concretes with Combined Aggregates. *Engineering Journal of Don*. 2019;55(4):40.

15. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Разрушение бетона в контактном слое на основе базовых положений общей теории сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне. В: *Сборник тезисов докладов Международного строительного конгресса «Наука. Инновации. Цели. Строительство».* Москва: АО «НИЦ «Строительство»; 2023. С. 39–43. https://doi.org/10.37538/2949-219%D0%A5-2023-39-43

Bedarev VV, Bedarev NV, Bedarev AV. The Destruction of Concrete in the Contact Layer Based on the Basic Provisions of General Theory of Adhesion and Anchoring of Periodic Profile Reinforcement in Concrete. In: *Proc. International Construction Congress "Science. Innovations. Goals. Construction"*. Moscow: Research Center of Construction; 2023. P. 39–43. (In Russ.) https://doi.org/10.37538/2949-219%D0%A5-2023-39-43

16. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е. Пименов Е.Г. Трещинообразование в крупнопористом бетоне с интегральным расположением крупного заполнителя. *Эксперт: теория и практика*. 2020;7(4):47–52. https://doi.org/10.24411/2686-7818-2020-10035

Pichugin AP, Khritankov VF, Smirnova OE, Pimenov EG. Crack Formation in Large-Porous Concrete with an Integral Arrangement of a Large Filler. *Expert: Theory and Practice*. 2020;7(4):47–52. (In Russ.)

17. Пшеничный Г.Н. Об особенностях формирования контактной зоны цементных бетонов. *Технологии бетонов.* 2015;110–111(9–10):56–60.

Pschenichniy GN. About the Features of Cement Concrete Surface Area. *Concrete Technologies.* 2015;110–111(9–10):56–60.

18. Дмитриева М.А., Шаранова А.В., Панфилова А.Д., Плахтий А.А. Реологические свойства строительных растворов, применяемых для 3D-печати. В: *Труды конференции «Современные строительные материалы и технологии»*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2019. С. 18–32.

Dmitrieva MA, Sharanova AV, Panfilova AD, Plakhtiy AA. Rheological Properties of Building Mortars Used for 3D Printing. In: *Proc. International Conference "Advanced Building Materials and Technologies".* Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2019. P. 18–32. (In Russ.)

19. Шаранова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Обеспечение безопалубочного формования бетонных строительных конструкций аддитивными технологиями. В: *Труды II международной конференции «Современные строительные материалы и технологии».* Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; 2020. С. 15–21.

Sharanova AV, Dmitrieva MA, Leitsin VN. Ensuring Formation of Concrete Building Constructions without Formwork by Additive Technologies. In: *Proc. II International Conference "Advanced Building Materials and Technologies".* Kaliningrad: IKBFU Publ.; 2020. P. 15–21.

20. Dvorak G.J. *Micromechanics of Composite Materials. Series: Solid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht: Springer; 2013. 442 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4101-0

21. Лейцин В.Н., Дмитриева М.А., Ивонин И.В. Пономарев С.В., Полюшко В.А. Товпинец А.О. и др. Определяющие факторы формирования структуры низкотемпературной керамики. *Физическая мезомеханика*. 2017;20(6):77–85.

Leitsin VN, Dmitrieva MA, Ivonin IV, PonomarevSV, Polyushko VA, Tovpinets AO, et al. Determining Factors of the Formation of the Structure of Low-Temperature Ceramics. *Physical Mesomechanics*. 2017;20(6):77–85. (In Russ.)

Об авторах:

Анастасия Вячеславовна Пузатова, заведующий лабораторией строительных материалов, старший преподаватель образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, a.v.puzatova@mail.ru

Мария Александровна Дмитриева, доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, dmitrieva_m@inbox.ru

Александр Олегович Товпинец, научный сотрудник образовательно-научного кластера института высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ATovpinets@mail.ru

Владимир Няхович Лейцин, доктор физико-математических наук, профессор образовательно-научного кластера Институт высоких технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), SPIN-код, ORCID, ScopusID, leitsin@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.В. Пузатова: проведение экспериментов, интерпретация результатов, оформление научной статьи.

М.А. Дмитриева: постановка задачи, научное сопровождение.

А.О. Товпинец: проведение эксперимента на томографе, обработка изображений, описание теоретической части исследований.

В.Н. Лейцин: редактирование статьи, формулировка выводов, научное сопровождение.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anastasiia V. Puzatova, Head of the Laboratory of Construction Materials, Senior Lecturer of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, a.v.puzatova@mail.ru

Maria A. Dmitrieva, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, dmitrieva_m@inbox.ru

Alexandr O. Tovpinets, Researcher of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ATovpinets@mail.ru

Vladimir N. Leitsin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Education and Research Cluster, Institute of High Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, Alexander Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, leitsin@mail.ru

Claimed Contributorship:

AV Puzatova: conducting experiments, interpreting the results, preparing the scientific article.

MA Dmitrieva: problem statement, scientific support.

AO Tovpinets: conducting an experiment on a tomograph, processing images, describing the theoretical part of the research.

VN Leitsin: article editing, conclusion formulation, scientific support.

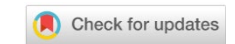
Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 07.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 02.07.2024
Принята к публикации / Accepted 10.07.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



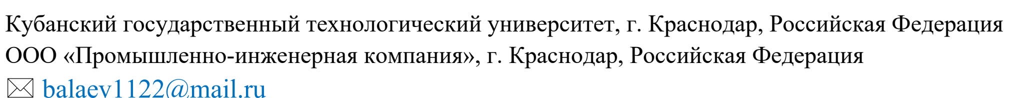


УДК 62-4; 622.23.05
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Оригинальное эмпирическое исследование

Самопозиционирование и самофиксирование деталей из сплавов с эффектом памяти формы при монтаже сборочных узлов


EDN: EWVFBZ



Э.Ю.О. Балаев
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
ООО «Промышленно-инженерная компания», г. Краснодар, Российская Федерация
✉ balaev1122@mail.ru

Аннотация

Введение. Нарушение взаимного позиционирования и фиксации деталей ухудшает работу оборудования. Достаточно изучены традиционные подходы к решению рассматриваемой проблемы: взаимозаменяемость деталей и использование специальной оснастки. Оба метода предполагают значительный объем дополнительных элементов и монтажных операций. Фиксацию часто обеспечивают с помощью посадки с натягом и сварки. Недостатки этих методов: монтажные, остаточные и другие напряжения, технические ограничения и пр. Для решения указанных проблем используют сплавы с термоупругими фазовыми превращениями, которые позволяют проявляться эффектам памяти формы (ЭПФ). В данной статье впервые описаны самопозиционирование и самофиксация на примере деталей, специально изготовленных из сплава с ЭПФ.

Материалы и методы. Исследовались стаканы из сплава с ЭПФ — Ti-55,7wt%Ni при запрессовке: штыревой элемент дорнует глухое отверстие и попадает в посадочное место. Температура начала аустенитного превращения — A_s = 95 °C ± 5 °C. Элементный состав определяли рентгенофлуоресцентным спектрометром Shimadzu EDX-8000, фазовый — дифрактометром Shimadzu XRD-7000. Температуру определяли дифференциальной сканирующей калориметрией. Диапазон 20–300 °C, скорость нагрева — 5 °C/мин. Задействовали тепловизор Guide T120 и 3D-сканер со структурированным подсветом RangeVision DIY. После запрессовки под разными углами штыря в стакан исследовали соосность и отклонения между осями стакана и штыря. Затем стакан нагревали до 110–120 °C, охлаждали и делали контрольные замеры.

Результаты исследования. Значения угла отклонения после запрессовки — 0,2–11°. При жесткой конструкции и угле установки 0° штырь отклоняется в посадочном отверстии на 0,2–0,5°. Оси смещаются и не пересекаются. Штырь не всегда полностью запрессовывается. Это говорит о неравномерной деформации металла и о разных по значению напряжениях вокруг отверстия. Такой узел быстро выйдет из строя. Штырь занимает требуемое положение после нагрева стакана до 110–120 °C (эта температура выше, чем в конце обратного мартенситного превращения). Отметили угловое отклонение осей — 0,03–0,1°. Максимальная несоосность (0,04 мм) соответствует высокой точности позиционирования. Нагрев при обратном мартенситном превращении создает внутренние напряжения, возвращающие первоначальную геометрию стакана. Они же формируют усилия, которые располагают и фиксируют штырь в отверстии. То есть именно детали обеспечивают позиционирование и фиксацию (это самопозиционирование и самофиксация).

Обсуждение и заключение. Для самопозиционирования и самофиксации деталей за счет эффекта памяти формы при конструировании следует отказаться от резких линий переходов между поверхностями деталей, выбирать скругленные углы или галтели, добиваться чистой поверхности без заусенцев. Самофиксация и самопозиционирование сокращают брак и неточности при сборке. Использование сплавов с эффектом памяти может повышать рентабельность производства.

Ключевые слова: эффект памяти формы, термоупругое фазовое превращение, самопозиционирование детали, самофиксация детали, взаимное позиционирование деталей, восстановление формы за счет возвратных напряжений

Благодарности. Автор благодарит кандидата технических наук, доцента Н.А. Шостака и научного сотрудника лаборатории перспективного проектирования нефтегазового оборудования Кубанского государственного технологического университета М.А. Самарина за помощь в планировании и проведении экспериментов. Автор также признателен редакционной коллегии журнала и рецензенту за компетентную экспертизу и рекомендации по улучшению статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00547 «Разработка принципов конструирования элементов бурового оборудования с применением материалов с эффектом памяти формы» https://rscf.ru/project/23-29-00547/

Для цитирования. Балаев Э.Ю.О. Самопозиционирование и самофиксирование деталей из сплавов с эффектом памяти формы при монтаже сборочных узлов. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):238–245. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Original Empirical Research

On Self-Positioning and Self-Fixation of Parts Made of Alloys with Shape Memory Effect under Component Assembling

Balaev Etibar Yusif Ogly
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
✉ balaev1122@mail.ru

Abstract
Introduction Violation of mutual positioning and fixation of parts worsens the operation of the equipment. Traditional approaches to solving the problem under consideration have been sufficiently studied: interchangeability of parts and the use of special equipment. Both methods involve a significant number of additional elements and assembly operations. Fixation is often provided by means of force fitting and welding. Disadvantages of these methods include assembly, residual and other stresses, engineering constraints, etc. To solve these problems, alloys with thermoelastic phase transformations are used, which provide shape memory effects (SME) to manifest themselves. This article describes, for the first time, self-positioning and self-fixation using the example of parts specially made from an alloy with SME.
Materials and Methods. The pin element under pressing mandrels the blind hole of the cup and enters the seat. The alloy with SME was Ti-55.7wt%Ni. The temperature of the onset of its austenitic transformation was A_s = 95°C ± 5°C. The elemental composition was determined by a Shimadzu EDX-8000 X-ray fluorescence spectrometer, the phase composition — by a Shimadzu XRD-7000 diffractometer. The temperature was specified through differential scanning calorimetry. The range was 20–300°C, the heating rate was 5 deg/min. A Guide T120 thermal imager and a RangeVision DIY 3D scanner with structured illumination were used. After pressing the pin into the cup at different angles, the alignment and deviations between the axes of the cup and the pin were examined. Then, the cup was heated to 110–120°C, cooled, and control measurements were taken.
Results. Values of the deflection angle after pressing were 0.2–11°. With a rigid structure and an installation angle of 0°, the pin deflected in the mounting hole by 0.2–0.5°. The axes shifted and did not intersect. The pin was not always completely pressed in. This indicated uneven deformation of the metal and different stress values around the hole. Such a unit would soon fail. The pin took the required position after heating the cup to 110–120°C (this temperature was higher than at the end of the reverse martensitic transformation). The angular deviation of the axes was noted to be 0.03–0.1°. The maximum misalignment (0.04 mm) corresponded to high positioning accuracy. Heating during the reverse martensitic transformation created internal stresses that returned the initial geometry of the cup. They also formed the forces that positioned and fixed the pin in the hole. That is, it is the parts that provide positioning and fixation (this is self-positioning and self-fixation).
Discussion and Conclusion. For self-positioning and self-fixation of parts due to the shape memory effect, it is necessary to avoid sharp transition lines between the surfaces of parts during design, select rounded corners or fillets, and get a clean surface without burrs. Self-fixation and self-positioning reduce defects and inaccuracies during assembly. The use of certain alloys increases the profitability of equipment production.

Keywords: shape memory effect, thermoelastic phase transformation, self-positioning of a part, self-fixation of a part, mutual positioning of parts, shape restoration due to return stresses

Acknowledgements. The author would like to thank N.A. Shostak, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, and M.A. Samarin, Research Associate of the Laboratory of Advanced Design of Oil and Gas Equipment, for assistance in planning and conducting experiments. In addition, the author appreciates the Editorial team of the Journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

Funding Information. The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23–29–00547 “Development of Principles for Designing Drilling Equipment Elements Using Materials with Shape Memory Effect”, https://rscf.ru/project/23-29-00547/

For Citation. Balaev EYuO. On Self-Positioning and Self-Fixation of Parts Made of Alloys with Shape Memory Effect under Component Assembling. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):238–245. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-238-245

Введение. Под самопозиционированием следует понимать пространственное ориентирование, установку и позиционирование детали и сопрягаемых с ней элементов в узлах и механизмах. Самофиксация — это сопряжение по поверхностям конструктивных элементов с такими геометрическими особенностями, которые обеспечивают фиксирование сопрягаемых деталей с задаваемым усилием фиксации за счет эффекта памяти формы.

От точности взаимного позиционирования деталей зависит корректность и надежность работы механизмов. Верное позиционирование может снизить инерционность механического узла, препятствует возникновению не предусмотренных конструкцией люфтов системы. Несоблюдение требований по взаимному позиционированию деталей может менять работу изделий, что в большинстве случаев недопустимо [1].

Требования к точности сборки узлов высоки во всех отраслях, особенно в станко-, авиа-, судостроении. Для правильного, плотного сопряжения деталей задействуют метод групповой взаимозаменяемости. Часто при сборке узлов используют специальную оснастку. Как правило, она уникальна для данного типа сборочной операции, обеспечивает точность позиционирования при монтаже и выполнение требований к точности размеров, форме, расположению и чистоте поверхности [2].

В производственной практике (особенно в строительстве [3] и нефтегазовой промышленности [4]) все чаще применяются сплавы с термоупругими фазовыми превращениями, которые обеспечивают эффект памяти формы (ЭПФ). Уникальность таких сплавов — в особенностях фазовых превращений, благодаря которым проявляются эффекты памяти формы, а также сверхэластичность (псевдоупругость) [5].

Память формы в сплавах с термоупругими фазовыми превращениями используется, в частности, для силовых приводов [6]. Эффект основан на возвратных напряжениях, восстанавливающих форму детали. Явление соответствует аустенитному фазовому состоянию элементов силового привода [7]. В нефтегазовой промышленности для соединения труб используются муфтовые соединения деталей [8]. Метод предполагает восстановление формы элементов, обеспечивающих охватывание и обжатие сопрягаемых деталей [9]. За счет эффекта памяти формы при сборке можно обеспечить такие процессы, как пространственное ориентирование, установку и позиционирование. Для этого целесообразно задействовать сразу два названных выше принципа:

– охватывание и обжатие деталей;

– восстановление формы за счет возвратных напряжений, приводящих к движению.

Такой подход позволяет сократить число этапов сборки и отказаться от использования специального оборудования (оснастки) при позиционировании и фиксации детали из сплава с термоупругим фазовым превращением и для сопрягаемых с ней элементов узла.

Предложенное решение открывает возможность заменить такие способы фиксации, как посадка с натягом и сварка. Следовательно, можно избежать и недостатков этих методов — монтажных, остаточных и других напряжений. Отметим также эксплуатационные ограничения, связанные с прочностью и надежностью фиксации. К тому же не всегда технически можно выполнить посадку с натягом и сварку.

Следует указать на еще одно преимущество деталей из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Их позиционирование и фиксация в сборочном узле позволяет отказаться от групповой взаимозаменяемости деталей, от пригоночных деталей и от дополнительного использования в конструкции регулирующих узлов и механизмов. Это упрощает монтаж и изготовление деталей при высокой точности позиционирования и надежной фиксации деталей в сборочном узле.

В представленной научной работе впервые предлагается использовать термоупругое фазовое превращение для позиционирования и последующей фиксации деталей в сборочном в узле. В этом случае эффект памяти формы деталей обеспечивает их самопозиционирование и самофиксацию.

Автор данной статьи наблюдал исследуемое явление при термоупругих превращениях, когда требовалось обеспечить фиксацию за счет эффекта памяти формы зубьев. В этом контексте рассматривались:

– шарошка бурового долота;

– замковый палец в лапе шарошечного долота;

– шарошка на лапе долота в конструкции шарошечного долота без замкового пальца;

– ниппель и муфты бурового замка [10];

– седла в корпусе дисковой поворотной заслонки;

– диск на штоке дисковой поворотной заслонки.

Цель работы — изучить возможности самопозиционирования (пространственное ориентирование, установка и позиционирование) и самофиксации при проявлении эффекта памяти формы сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Предполагается выяснить, какая точность обеспечивается в данном случае при проектировании и монтаже сборочных узлов и какие условия нужно обеспечить при сборке (конструктивные особенности, приемы, требования для реализации самопозиционирования и самофиксации).

Материалы и методы. Для экспериментов изготовили два образца из сплава с термоупругим фазовым превращением. По форме это стаканы со специальным глухим отверстием и штыревым элементом из термически обработанной (закаленной) стали 40Х. У стакана есть отверстие — две конические ступени с прямым (заходный) и обратным (фиксирующий) конусом. Переходы — по радиусу и по линии пересечения конусов. У штыревого элемента форма дорна, поэтому при запрессовке в стакан он дорнует глухое отверстие и попадает в посадочное место в стакане. Все поверхности чистые, без углов и заусенцев. Таким образом обеспечиваются:

– свободное скольжение запрессовываемого штыревого элемента;

– пространственное ориентирование и установка в посадочное место под штыревой элемент в стакане;

– позиционирование штыревого элемента в посадочном месте.

На рис. 1 показаны этапы запрессовки штыревого элемента в стакан, изготовленный из сплава с ЭПФ.

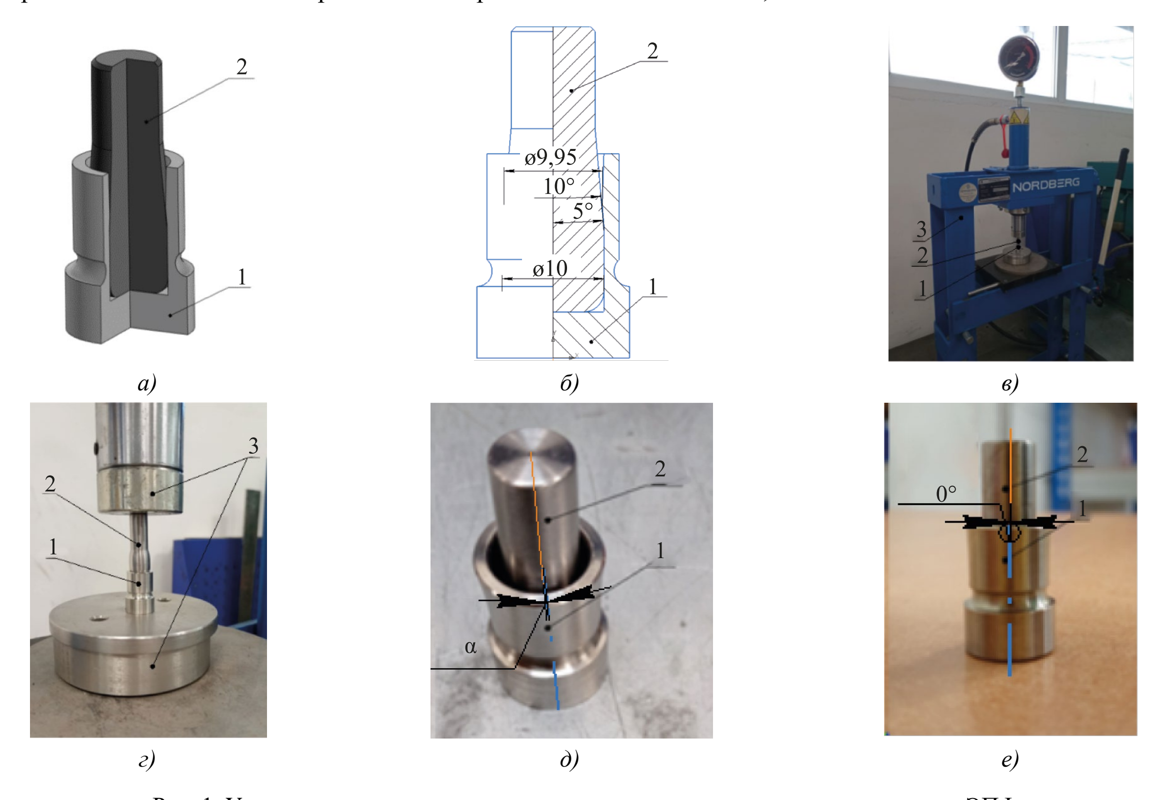


Рис. 1. Установка штыревого элемента в посадочное место стакана из сплава с ЭПФ:
а — 3D-модель сборки элементов после установки штыревого элемента 2 в стакан 1;
б — сборочный чертеж; *в, г* — установка в ручной пресс 3 штыревого элемента 2 и стакана 1 перед запрессовкой штыревого элемента в стакан; *д* — угол между осями симметрии α после запрессовки штыревого элемента 2 в стакан 1 перед нагревом (комнатная температура — мартенситная фаза сплава); *е* — штыревой элемент и стакан при комнатной температуре после нагрева до 110 °С (угол между осями симметрии 0°, аустенитная фаза сплава)

В качестве сплава с ЭПФ выбрали никелид титана Ti-55,7wt%Ni. Температура начала его аустенитного превращения — A_s = 95 °С ± 5 °С. Определили три перечисленных ниже свойства.

1. Элементный состав. Для этого провели рентгенофлуоресцентный анализ с помощью прибора Shimadzu EDX-8000 (Япония).

2. Фазовый состав. Выполнили рентгенофазовый анализ с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (Япония). Параметры: Cu, Kα — 1,54 A^0, 40 кВ, 30 mA, диапазон углов 20–90°, скорость съемки 1град/мин.

3. Температура. Определили методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Работали с диапазоном 20–300 °С. Скорость нагрева — 5 град/мин.

Данный сплав позволяет продемонстрировать общие принципы самофиксации и самопозиционирования штыревого элемента в посадочном месте стакана при фазовом переходе из мартенсита в аустенит. При комнатной температуре сплав находится в мартенситной фазе.

Для запрессовки задействовали ручной пресс Nordberg. Стакан из сплава с ЭПФ нагревали техническим феном GHG 23–66 Bosch. Регулирование температуры позволяло неравномерно нагревать стакан и максимально имитировать технологический процесс монтажа на предприятиях. В частности, воссозданы худшие условия монтажа и работа при нарушениях технологического процесса.

Температура и зоны нагрева, а также прогрев по всей поверхности до заданной температуры отслеживались при помощи тепловизора Guide T120. Точность позиционирования определяли стационарным 3D-сканером со структурированным подсветом RangeVision DIY. Камеры Daheng обеспечили точность измерения 0,02 мм.

Ниже описана последовательность операций при установке штыревого элемента в стакан.

1. Штыревой элемент запрессовывается в глухое отверстие стакана. В результате отверстие дорнуется. Оно углубляется до тех пор, пока штыревой элемент не попадет в посадочную поверхность отверстия. Процесс проходит при комнатной температуре, соответствующей мартенситному фазовому состоянию сплава Ti-55,7wt%Ni с эффектом памяти формы.

2. Замеряется взаимное расположение деталей.

3. Стакан контролируемо нагревается до тех пор, пока температура не окажется выше, чем была в конце аустенитного превращения. При такой температуре восстанавливалась первоначальная (до деформации) форма стакана, а усилия от возникающих возвратных напряжений было достаточно для смещения и ориентирования штыревого элемента внутри глухого отверстия стакана. После этого стакан охлаждается до комнатной температуры.

4. Выполняется контрольный замер взаимного расположения деталей.

Штыревой элемент прессовали в стакан под разными углами между осями симметрии стакана и штыревого элемента. Размеры углов — от 0 до 12°. Шаг — 3°. Определялись соосность и угол отклонения между осями. Затем стакан нагревали до 110–120 °C и охлаждали различными способами — от свободного охлаждения на воздухе до принудительного (опусканием в воду). Затем делали контрольный замер соосности и угла отклонения между осями.

Результаты исследования. После запрессовки угол отклонения между осями стакана и штыревого элемента имел значения в диапазоне от 0,2° до 11° (угол α на рис. 2 *а*). Это говорит о том, что при жесткости конструкции и угле установки 0° все равно происходит некоторое смещение штыревого элемента в посадочном отверстии (от 0,2° до 0,5°).

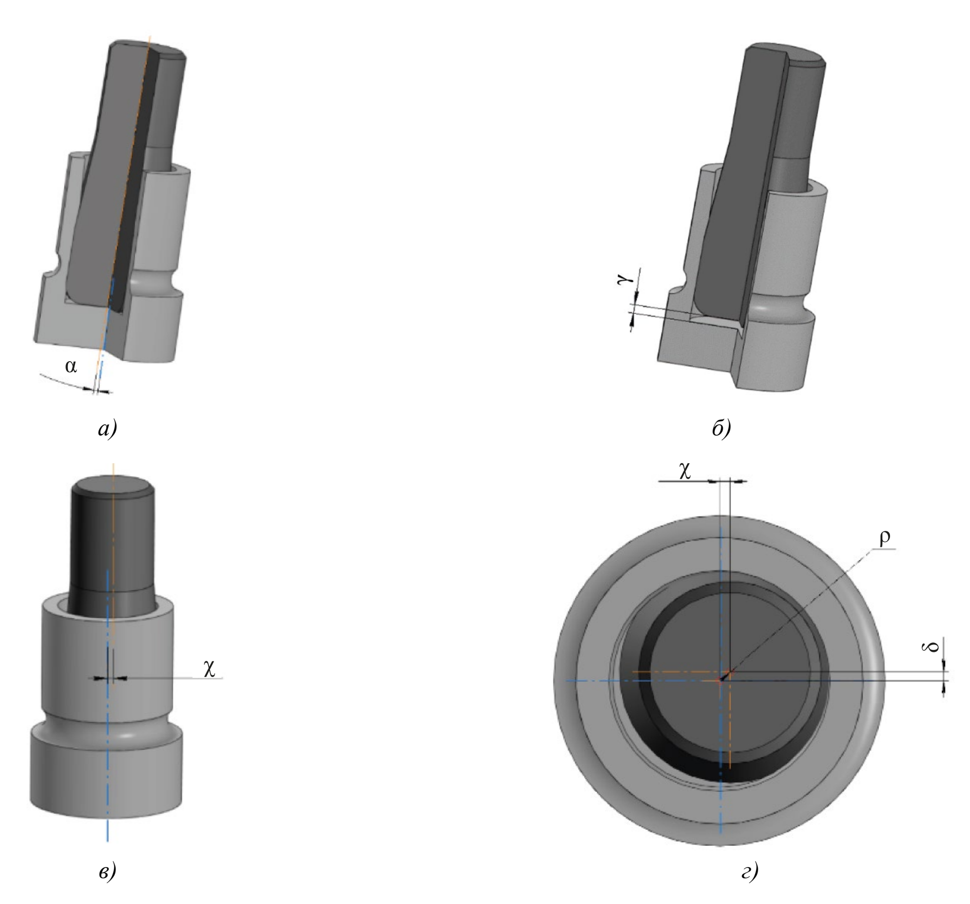


Рис. 2. Отклонения, возникающие при монтаже штыревого элемента в посадочное отверстие стакана:
а — угол между осями симметрии; *б* — смещение в результате недопрессовки;
в, г — смещение осей симметрии в плоскости сечения перпендикулярно осям симметрии штыревого элемента и стакана

Оси были смещены и не имели точки пересечения, как показано на рис. 2 *в* и 2 *г*. Если принять за центр ось стакана (точку отсчета), смещение оси штыревого элемента составит ρ = 0,2–0,8 мм (рис. 2 *г*), т. е. у штыревого элемента в стакане будет смещенное монтажное положение. В ряде случаев штыревой элемент был не полностью запрессован в стакан (рис. 2 *б*). Это, во-первых, обусловливает неравномерную деформацию металла вокруг отверстия. Во-вторых, говорит о том, что в результате запрессовки возникают различные по значению напряжения вдоль окружности отверстия. Такой узел при использовании быстро выйдет из строя.

Штыревой элемент занимает требуемое положение в отверстии стакана и относительно посадочного места отверстия после нагрева стакана до 110–120 °С, то есть при температуре выше, чем в конце обратного мартенситного превращения.

Точность позиционирования штыревого элемента в стакане исследовали с помощью стационарного 3D-сканера со структурированным подсветом RangeVision DIY и с камерами Daheng. Зафиксировали угловое отклонение осей в диапазоне 0,03–0,1°. Максимальное значение несоостности составило 0,04 мм, что соответствует высокой точности позиционирования для сборочных единиц.

Следует отметить схожесть двух механизмов, которые обеспечивают:

– занятие конструктивно требуемого положения штыревого элемента в отверстии стакана;

– действие рабочего органа, изготовленного из сплава с ЭПФ силового двигателя.

Заданная форма детали из сплава с ЭПФ стакана в аустенитном состоянии соответствует форме, при которой штыревой элемент точно занимает положение, необходимое по конструкции узла. При температуре, соответствующей мартенситному фазовому состоянию, механические характеристики сплава ниже, чем при температуре, соответствующей аустениту. В этом случае можно задать форму, в которую легко вмонтируется штыревой элемент. При таком монтаже позиционирование штыревого элемента не соответствует требуемому.

Последующий нагрев стакана в результате обратного мартенситного превращения создает внутренние напряжения, которые позволяют вернуть первоначальную форму. Их можно условно назвать возвратными напряжениями. При этом:

– стакан приобретает форму, соответствующую эксплуатационным геометрическим характеристикам;

– усилия, возникающие в результате действия возвратных напряжений, достаточны для перемещения, ориентирования, установки и позиционирования штыревого элемента в посадочном месте стакана (он располагается и фиксируется в отверстии).

Как видим, именно детали обеспечивают самопозиционирование и самофиксацию. Не нужны ни специальная оснастка, ни особенные монтажные приемы.

Есть процесс, схожий с описанным выше. Для приведения в движение механизма развертывания антенн спутников силовой привод использует усилие, развиваемое возвратными напряжениями при обратном мартенситном превращении рабочего элемента, изготовленного из сплава с ЭПФ.

Обсуждение и заключение. Перемещение штыревого элемента внутри посадочного отверстия стакана обеспечивается конструктивными особенностями, которые можно применить для всех сопрягаемых деталей при самопозиционировании и самофиксации за счет эффекта памяти формы сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. Ниже перечислены приемы, которые позволяют добиться необходимых конструктивных особенностей:

– отказ от резких линий переходов между поверхностями деталей в пользу более плавных;

– выбор скругленных или с переменным радиусом фасок и внешних углов;

– замена внутренних углов галтелями или кривыми с переменным радиусом;

– качественная очистка поверхности, исключение заусенцев.

Следует учитывать данные требования при проектировании. Это позволит обеспечить необходимое взаимное перемещение деталей со значительно меньшим усилием. В данном случае усилие сравнивается с тем, которое дают возвратные напряжения при обратном мартенситном превращении сплава с термоупругими фазовыми превращениями (из такого материала изготовлен стакан).

Самофиксация и самопозиционирование способны обеспечить точность сборки, исключить монтажные и технологические неточности при сборочных работах, сократить брак. Использование некоторых сплавов имеет экономический смысл, то есть работает на рентабельность производства конечного продукта [11]. Эти и другие преимущества описанного в статье подхода могут быть реализованы в станкостроении. Метод представляется полезным для разработки нефтегазового, прецизионного и иного оборудования с высокими требованиями к геометрической точности деталей.

Список литературы / References

1. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Технологическое обеспечение сборки на основе принципов выявления критичных требований к высокоточным изделиям. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(1):66–77. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77

Nazaryev AV, Bochkarev PYu. Improving the Principles of Identifying Critical Requirements for the Assembly of High-Precision Products. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):66–77. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-66-77

2. Анурьев В.И. *Справочник конструктора-машиностроителя*. В 3 т. Т. 1. 8-е изд. Москва: Машиностроение; 2001. 920 с. URL: https://www.prugini-spb.ru/anuriev/Anuriev_T1.pdf (дата обращения: 06.06.2024).

Anur'ev VI. *Handbook of a Mechanical Designer.* In 3 vol. Vol. 1. 8th ed. Moscow: Mashinostroenie; 2001. 920 p. (In Russ.) URL: https://www.prugini-spb.ru/anuriev/Anuriev_T1.pdf (accessed: 06.06.2024).

3. Малинин В.Г., Муссауи Ю.Ю., Бурдин Ю.А. Вопросы практического применения материалов с памятью формы для усиления строительных конструкций. *Строительство и реконструкция.* 2017;70(2):23–31.

Malinin V, Moussaoui Yu, Burdin Yu. The Application of Shape Memory Alloys for Civil Structures Reinforcement. *Building and Reconstruction.* 2017;70(2):23–31.

4. Агиней Р.В., Некучаев В.О., Семиткина Е.В., Терентьева М.В. Возможности применения инновационных материалов с памятью формы в нефтяной промышленности. *Нефтегазовое дело.* 2020;18(1):39–47. http://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-1-39-47

Aghiney RV, Nekuchaev VO, Semitkina EV, Terentyeva MV. Opportunities for Using Innovative Shape Memory Effect Materials in Oil Industry. *Petroleum Engineering.* 2020;18(1):39–47. http://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-1-39-47

5. Duerig TW, Pelton AR, Bhattacharya K. The Measurement and Interpretation of Transformation Temperatures in Nitinol. *Shape Memory and Superplasticity.* 2017;3:485–498. http://doi.org/10.1007/s40830-017-0133-0

6. Шишкин С.В., Махутов Н.А. *Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы.* Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований; 2019. 411 с.

Shishkin SV, Makhutov NA. *Calculation and Design of Power Structures on Alloys with Shape Memory Effect.* Izhevsk: RDE “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, Institute of Computer Research; 2019. 411 p. (In Russ.)

7. Барвинок В.А, Богданович В.И, Грошев А.А. Плотников А.Н., Ломовской О.В. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013;15(6):272–277.

Barvinok VA, Bogdanovich VI, Groshev AA, Plotnikov AN, Lomovsky OV. Design Method of Power Drives from Material Shape Memory Effect for Rocket and Space Technology. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science.* 2013;15(6):272–277.

8. Андронов И.Н., Семиткина Е.В. Применение муфты переменного диаметра из материала с памятью в качестве соединительного элемента на промысловых трубопроводах. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море.* 2017;(11):20–27.

Andronov IN, Semitkina EV. Use of a Variable-Diameter Coupling Manufactured from Some Material with Memory as a Connecting Element on Fields Flowlines. *Onshore and Offshore Oil and Gas Well Construction.* 2017;(11):20–27.

9. Ломовской О.В., Вашуков Ю.А., Белашевский Г.Е., Богданович В.И., Барвинок В.А. Сборка элементов трубопроводов с применением технологического оснащения с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2003;(3):4.

Lomovskoy OV, Vashukov YuA, Belashevskiy GE, Bogdanovich VI, Barvinok VA. Assembly of Pipeline Elements Using Technological Equipment with a Power Drive Made of Alloy with Shape Memory Effect. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making.* 2003;(3):4. (In Russ.)

10. Ruban DA, Cherkesov TA, Balaev EYuO, Gerasimov DV. Use of Materials with Shape Memory Effect to Improve the Performance Properties of Parts of Drill String. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies.* 2019;775:102–112. https://doi.org/10.1088/1757-899X/775/1/012122

11. Терехин А.Г. О материалах с эффектом памяти и особенностях их применения. *Инновации и инвестиции*. 2020;(6):222–223.

Terekhin AG. About Materials with a Memory Effect and Features of Their Application. *Innovations and Investments.* 2020;(6):222–223.

Об авторе:

Эътибар Юсиф Оглы Балаев, старший научный сотрудник кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), инженер по изобретательской и патентной деятельности ООО «Промышленно-инженерная компания» (350080, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Уральская, 144), SPIN-код, ORCID, ScopusID, balaev1122@mail.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Etibar Yusif Ogly Balaev, Senior Research Fellow of the Department of Oil and Gas Engineering named after Prof. GT Vartumyan, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), Invention and Patent Engineer, Industrial-Engineering Company LLC (144, Uralskaya Str., Krasnodar, 350080, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, balaev1122@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 18.07.2024
Принята к публикации / Accepted 01.08.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

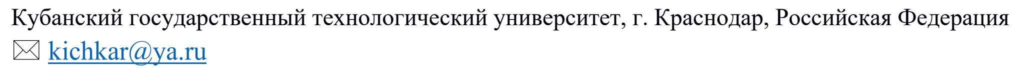



УДК 681.5:622.24
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Оригинальное теоретическое исследование

Математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита

И.Ю. Кичкарь
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
✉ kichkar@ya.ru




EDN: IULDLM

Аннотация

Введение. При бурении нефтяных или газовых скважин порода из забоя выносится на поверхность буровым раствором, который очищается от шлама на первой стадии виброситами. Вибросита оснащаются такой сеткой и создают такие траектории виброколебаний рамы, чтобы с одной стороны — обеспечивать очистку поступающего из устья скважины бурового раствора, а с другой — обеспечивать должную степень очистки. Для корректного подбора номенклатуры сеток нужно надежно определять пропускную способность вибросита в реальных условиях. Это позволит заранее заказать требуемое количество сеток с нужным размером ячеек. Ранее исследования проводились путем просеивания смеси калиброванных гранул на стандартном вибростенде или процеживанием минерального масла через неподвижную сетку. Однако это не в полной мере соответствует реальным условиям просеивания бурового раствора. Целью данной работы было моделирование пропускной способности бурового вибросита в реальных условиях путем расчета движения бурового раствора по вибрирующей сетке с использованием её ранее полученной удельной пропускной способности.

Материалы и методы. При создании математической модели полной пропускной способности бурового вибросита использовалась известная ранее математическая модель течения жидкости в открытом канале и конечномерная аппроксимация в виде последовательности участков из сосредоточенных емкостей, соединенных гидравлическими проводимостями (по аналогии с аппроксимацией электрических длинных линий и протяженных газопроводов методом конечных элементов). Расход течения жидкости над сеткой определялся по закону Шези. При этом площадь сечения потока над сеткой для конкретного участка определялась как среднее арифметическое между начальным и конечным значением высоты бурового раствора на соответствующем участке.

Результаты исследования. Составлена цепная расчетная схема просеивания бурового раствора. На основании материального баланса разработаны математические модели определения пропускной способности и высоты бурового раствора над сеткой:
- для первого участка сетки и первой узловой точки сетки;
- для последующих участков сетки и последующих узловых точек сетки;
- для последнего участка сетки и крайней узловой точки сетки.

Получена математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита, которая вследствие конечномерного представления этого потока по n участкам длины сетки представляет собой систему из n интегральных уравнений, описывающих сосредоточенные емкости, и n – 1 алгебраических уравнений, описывающие перетоки бурового раствора между емкостями.

Обсуждение и заключение. Движение бурового раствора по длине сетки вибросита соответствует движению установившегося неравномерного потока в открытом русле. Однако в первом случае — объемный расход по длине переменный (убывающий до нуля), а во втором случае — постоянный по длине. Поэтому использование только одного дифференциального уравнения установившегося неравномерного потока в открытом русле в данном случае недостаточно.

Полученная математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита является математическим обоснованием для разработки моделирующей программы по определению пропускной способности вибросита для реальных условий его работы, то есть для конкретного бурового раствора, данной сетки или заданной системы приводов вибросита.

Ключевые слова: буровое вибросито, вибрирующая сетка, высота слоя раствора, материальный баланс, пропускная способность, граничные условия, узловые точки

Благодарности. Автор выражает признательность кафедре «Автоматизации производственных процессов» ФГБОУ ВО «КубГТУ» за помощь в подготовке статьи.

Для цитирования. Кичкарь И.Ю. Математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):246–254. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Original Theoretical Research

Mathematical Model of Drilling Mud Movement along a Shale Shaker Screen

Ilia Yu. Kichkar
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
✉ kichkar@ya.ru

Abstract

Introduction. When drilling oil or gas wells, rock from the bottomhole is brought to the surface by drilling mud, which is cleaned of sludge by shale shakers at the first stage. Shale shakers are equipped with such a screen and create such trajectories of vibration of the frame in order to solve a dual problem: on the one hand, to provide the cleaning of the drilling mud coming from the well mouth, and on the other hand — to maintain the proper degree of cleaning. To correctly select the nomenclature of screens, it is necessary to reliably determine the throughput capacity of a shale shaker in the real-time setting. This will allow you to pre-order the required number of screens with the required cell size. Previously, studies were conducted by sieving a mixture of calibrated granules on a standard shaker or by straining mineral oil through a fixed screen. However, this does not fully correspond to the actual conditions of drilling mud screening. The objective of this article was to simulate the throughput of a drilling shale shaker under real conditions by calculating the movement of drilling mud along a vibrating screen using its previously obtained specific throughput capacity.

Materials and Methods. When creating a mathematical model of the full throughput capacity of a shale shaker, a previously known mathematical model of fluid flow in an open channel and a finite-dimensional approximation in the form of a sequence of sections of concentrated containers connected by hydraulic conductivities (by analogy with the approximation of long electrical lines and extended gas pipelines by the finite element method) were used. The fluid flow rate over the screen was determined according to Chézy law. In this case, the cross-sectional area of the flow above the screen for a specific section was specified as the arithmetic mean between the initial and final values of the drilling mud height in the corresponding section.

Results. A chain calculation scheme for sieving drilling mud was compiled. Based on the material balance, mathematical models were developed for determining the throughput and height of drilling mud above the screen:

– for the first section of the screen and the first nodal point of the screen;

– for subsequent screen sections and subsequent screen nodal points;

– for the last section of the screen and the last nodal point of the screen.

A mathematical model of the drilling mud movement along the shale shaker screen has been obtained, which, due to the finite-dimensional representation of this flow along n sections of the screen length, is a system of n integral equations describing concentrated tanks, and $n – 1$ algebraic equations describing the flow of drilling mud between tanks.

Discussion and Conclusion. The movement of drilling mud along the length of the shale shaker screen corresponds to the movement of a steady uneven flow in an open channel. However, in the first case, the volume flow along the length is variable (decreasing to zero), and in the second case, it is constant along the length. Therefore, the use of only one differential equation for steady uneven flow in an open channel is not sufficient in this case. The resulting mathematical model of the drilling mud movement along the shale shaker screen is a mathematical basis for the development of a modeling program to determine the throughput of the shale shaker for real operating conditions, i.e., for a specific drilling mud, a given screen or a given drive system of the shale shaker.

Keywords: shale shaker, vibrating screen, height of the mortar layer, material balance, throughput capacity, edge condition, nodal points

Acknowledgements. The author appreciates the Production Automation Department, KubSTU, for assistance in preparing the article. The author would like to thank the reviewers for their criticism and suggestions, which contributed to a significant improvement in the quality of the article.

For Citation. Kichkar IYu. Mathematical Model of Drilling Mud Movement along a Shale Shaker Screen. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):246–254. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Введение. Пропускная способность комплекса очистки бурового раствора от шлама циркуляционной системы буровой установки лимитируется расходом циркулирующего бурового раствора, который должен быть очищен должным образом [1]. Под пропускной способностью понимается объем бурового раствора, просеянный сквозь сетку, а в качестве расхода — объем бурового раствора, протекший без просеивания. Вибросито является первым технологическим аппаратом в этом комплексе и осуществляет грубую очистку. Поэтому его пропускная способность в основном определяет пропускную способность всей системы очистки.

Пропускная способность комплекса очистки циркуляционной системы (ЦС) стандартной буровой установки должна превышать производительность бурового насоса и составлять порядка 30–80 л/с. Недостаточная пропускная способность ЦС ограничивает скорость проходки [2].

Циркулирующий буровой раствор поступает на вибросито напрямую из устья скважины по желобу. Здесь нет промежуточных емкостей, поэтому даже если его расход кратковременно превысит пропускную способность вибросита, то буровой раствор по сетке перельется в отвал, что приведет к его потере. Если помощник бурильщика откроет шиберную заслонку, то неочищенный буровой раствор мимо сетки вибросита поступит в емкость. Это крайне нежелательный случай, так как шлам оседает в емкости, не позволяя перекачивать его насосом в пескоотделитель. Это резко снижает степень очистки бурового раствора, что приводит к увеличению затрат на бурение и даже к осложнениям в скважине [2].

Пропускная способность конкретного вибросита во многом определяется размером ячейки сетки, которой оно оснащено. С уменьшением размера ячейки существенно уменьшается пропускная способность вибросита, но повышается степень очистки бурового раствора. На практике для предотвращения пропуска раствора мимо вибросита на нем устанавливают сетку с более крупной ячейкой с большим, но неизвестным запасом по пропускной способности [1].

Реальное измерение пропускной способности вибросита затруднено, т.к. после просеивания через сетку раствор сливается в емкость под виброситом самотеком, не проходя по трубопроводу. Поэтому определение пропускной способности бурового вибросита проводилось косвенными методами.

В работе [2] на основании производственного опыта указаны параметры, изменяющие пропускную способность: увеличение длины сетки, снижение скорости потока, уменьшение угла наклона сетки, изменение направления перемещения частиц, уменьшение амплитуды колебаний сетки, одновременное использование двух последовательных или параллельных сеток. Однако авторы не приводят количественные показатели данных параметров. В работе [3] приведены значения пропускной способности бурового вибросита при работе с различными буровыми растворами, но не приводится общая формула. В[1] указывается только формула для расчета изменения пропускной способности. Задача выбора сетки для конкретного случая решена в обзоре коллектива американских инженеров[2]. Она состоит в том, чтобы выбрать сетку с наименьшей ячейкой, при которой вибросито обладало бы пропускной способностью больше заданной. Для испытаний сеток разработано несколько методов, но все они далеки от условий работы вибросит на буровых установках. Так в стандарте API Recommended practice 13C сетки испытываются или просеиванием смеси калиброванных гранул на стандартном вибростенде или процеживанием минерального масла через неподвижную сетку. В работе [4] сделана попытка на основе уравнения Навье-Стокса аналитически описать движение потока бурового раствора по сетке и процесс просеивания его через сетку. Результаты моделирования не учитывают динамические параметры грохота. Эти параметры учтены в работе [5], но в качестве исследуемого не для бурового раствора, а для угольного шлама. Количество всего удаляемого шлама от общей массы сравнительно невелико [6]. Такая концентрация шлама не оказывает заметного влияния на реологию бурового раствора [3]. Соответственно разделение процесса обезвоживания, приведенное в [7] нецелесообразно. Большая концентрация шлама наблюдается в буровом растворе, выходящего из пескоотделителей и илоотделителей, который очищается на втором вибросите[3].

[1] *American Association of Drilling Engineers Shale Shakers and Drilling Fluid System.* Houston: Gulf Publishing Company; 1999. 335 p.
[2] Там же. С. 3–335.
[3] Там же. С. 3–335.

Из всего вышесказанного следует, что определить значение пропускной способности бурового вибросита с помощью теоретических исследований пока не получалось. Поэтому целью данной работы было моделирование полной пропускной способности бурового вибросита на основании проведенных ранее лабораторных экспериментов по определению удельной пропускной способности.

Удельная пропускная способность. Коллективом с участием автора ранее была разработана методика [7], техническое и программное обеспечение для экспериментального определения математической модели удельной пропускной способности конкретной сетки первого вибросита по реальному буровому раствору для конкретного вибросита, проведены экспериментальные исследования [8]. Если у всех точек рамы сита, расположенных по линии сетки, траектории виброколебаний одинаковы, или, как говорят в вибротехнике «траектории однородны», то достаточно провести один эксперимент. Если траектории неоднородны, то достаточно провести три эксперимента при траекториях на краях и в центре сетки. В любом случае параметры виброколебаний точек рамы у производственного вибросита должны быть известны и реализованы в экспериментах.

Известны экспериментальные стенды других ученых, например, в работе [9] описан стенд, который создает полигармонические траектории колебаний. Это достигается соответствующей компоновкой системы привода с кратной частотной вращения. В ходе экспериментов получены даже фигуры Лиссажу [10]. Полученная наилучшая конструкция может работать менее эффективно за счет внешних воздействий. При этом целью автоматического управления является компенсация негативного влияния внешних воздействий. В работе [11] приведен способ управления, в [12] — динамические параметры вибросита в ходе управления, а в [13] приведен пример пошаговой оптимизации с помощью комплексов моделирования Adams и Nastran.

Проведенные эксперименты по просеиванию воднобентонитового раствора плотностью 1,19 г/см^3 через образец сетки с квадратными ячейками размером 0,4×0,4 мм позволили получить следующую математическую модель удельной пропускной способности сетки [9]

$$q\left(h, Ay\right) = 0,0088 \cdot h^{1,62} \cdot Ay^{1,59}, \quad (1)$$

где $q(h, Ay)$ — удельная пропускная способность сетки, м^3/м^{2}с; h — высота слоя бутового раствора на сетке, м; Ay — амплитуда вертикального виброускорения, м/с^2.

Граничные условия процесса просеивания

Наличие математической модели удельной пропускной способности недостаточно для определения пропускной способности бурового вибросита. Необходимо также знание распределения высоты слоя бурового раствора по длине сетки $h(x)$ при известном расходе раствора, поступающего на сетку сита $Q(0)$. Принять в первом приближении линейное распределение высоты по длине сетки не представляется возможным, так как неизвестно граничное условие в конце процесса просеивания $h(0)$ Граничное условие начала процесса просеивания, как было описано ранее, известно и имеет вид $h(0,8 \cdot L) = 0$, где L — длина сетки, м.

В классической гидравлике известна математическая модель распределения высоты слоя жидкости по длине потока при безнапорном установившемся неравномерном течении жидкости в открытом канале [14]. Однако расход жидкости в этом случае постоянен по длине потока, а в нашем случае расход уменьшается вследствие просеивания части бурового раствора. Следовательно, установившееся движение потока бурового раствора по сетке вибросита представляет собой объект с распределенными по длине сетки переменными $h(x)$ и $Q(x)$.

Методы расчета распределенных объектов

Поиск инженерных решений подобных задач показал, что в электротехнике электрические длинные линии заменяют цепочкой сосредоточенных сопротивлений, емкостей и индуктивностей [15]. Протяженные газопроводы для моделирования их работы заменяют цепочкой перемежающихся емкостей и гидравлических сопротивлений [16]. Особенно часто подобный подход используется в динамике машин, где по чертежам общих видов строятся цепные расчетные схемы, состоящие из перемежающихся сосредоточенных масс или моментов инерции и сосредоточенных податливостей для вибрационных машин [17] и систем управления [18]. Это по сути является конечно-элементной аппроксимацией распределенных объектов.

Построение математической модели полной пропускной способности бурового вибросита

Построим расчетную схему потока бурового раствора из сосредоточенных емкостей и сосредоточенных гидравлических проводимостей, приведенную на рис. 1. Для этого разобьем длину сетки вибросита узловыми точками на равные участки длиной $\Delta x = L/m$, где m — число участков. Узловые точки обязательно должны стоять в начале и в конце сетки. В узловые точки поместим сосредоточенные емкости. Начальной и конечной емкости соответствует участок потока длиной $0,5 \cdot \Delta x$, остальным емкостям — Δx.

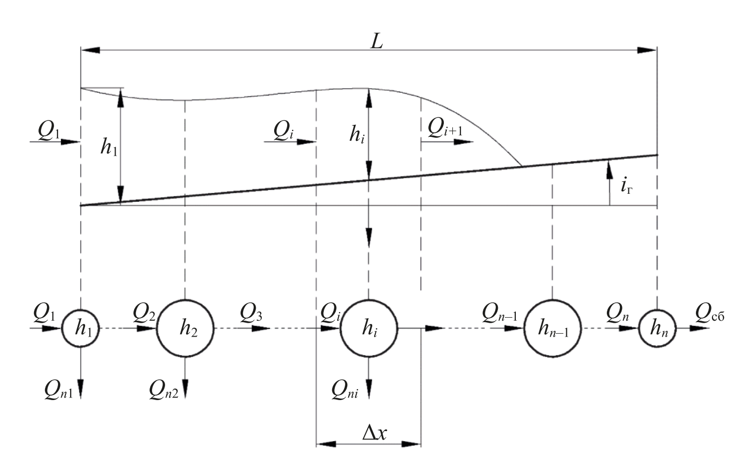


Рис. 1. Цепная расчетная схема гидравлической системы движения потока бурового раствора по сетке

Уравнение материального баланса для первой емкости на рис. 1 имеет вид:

$$\left(Q_1(t) - Q_2(t) - Q_{n1}(t)\right) \cdot dt = \frac{\Delta x}{2} \cdot b \cdot dh_1(t), \tag{2}$$

где $Q_1(t)$ — расход бурового раствора, поступающий на вибросито, м^3/с; $Q_2(t)$ — расход бурового раствора, вытекающий сетке из емкости 1-й узловой точки в емкость 2-й узловой точки, м^3/с; $Q_{n1}(t)$ — расход бурового раствора, просеянный на первом участке, м^3/с; $h_1(t)$ — высота слоя раствора в первой узловой точке, м; b — ширина сетки, м.

Просеянный расход в первой узловой точке с учетом удельной пропускной способности равен:

$$Q_{n1}(t) = q\left(h_1(t), Ay_1\right) \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot b, \tag{3}$$

где Ay_1 — амплитуда виброускорения в первой узловой точке.

Подставив выражение (3) в (2) и преобразовав уравнение, получим выражение для $h_1(t)$:

$$h_1(t) = \int \left[\frac{2}{\Delta x \cdot b} Q_1(t) - Q_2(t) - q\left(h_1(t), Ay_1\right) \right] \cdot dt. \tag{4}$$

Уравнение материального баланса для емкостей всех промежуточных узловых точек на рис. 1 имеет вид:

$$\left(Q_i(t) - Q_{i+1}(t) - Q_{ni}(t)\right) \cdot dt = \Delta x \cdot b \cdot dh_i(t), \tag{5}$$

где $Q_i(t)$ — расход бурового раствора, втекающий в емкость i-той узловой точки, м^3/с; $Q_{i+1}(t)$ — расход бурового раствора, вытекающий по сетке из емкости i-й узловой точки в емкость $i+1$-й узловой точки, м^3/с; $Q_{ni}(t) = q(h_i(t), Ay) \cdot \Delta x \cdot b$ — расход бурового раствора, просеянный на i-ом участке, м^3/с; $h_i(t)$ — высота слоя раствора в i-ой узловой точке, м.

Преобразовав уравнение (5), получим выражение для $h_i(t)$ всех промежуточных узловых точек:

$$h_i(t) = \int \left[\frac{1}{\Delta x \cdot b} \left(Q_i(t) - Q_{i+1}(t)\right) - q\left(h_i(t), Ay_i\right) \right] \cdot dt. \tag{6}$$

В последней узловой точке исходя из физических соображений примем высоту слоя раствора нулевой (С), чтобы не подпирать поток в случае течения его в отвал. Это по сути — правое граничное условие для высоты слоя раствора. Расход бурового раствора, поступающий на вибросито, в данной математической модели принят постоянным и равным заданной величине $Q_1(t) = Q_{1\ зад}$. Это косвенное задание левого граничного условия для высоты слоя раствора.

Все промежуточные расходы $Q_i(t)$ на рис. 1 определяются перепадом высот слоя раствора $h_{i-1}(t) - h_i(t)$ и сосредоточенным гидравлическим сопротивлением участка сетки. Буровой раствор является неньютоновской жидкостью, но при турбулентном течении глинистых растворов можно исходить из обычных формул гидравлики [19].

Для определения расхода $Q_i(t)$ не будем определять величину гидравлического сопротивления участка сетки длиной Δx, а воспользуемся известным дифференциальным уравнением установившегося неравномерного потока постоянного расхода [20], но для поднятой сетки:

$$\frac{dh(x)}{dx} = -\left(i_г + \frac{Q^2}{F^2 \cdot C^2 \cdot R}\right) \Bigg/ \left(1 - \frac{\alpha}{g} \cdot \frac{Q^2}{F^2} \cdot b\right), \tag{7}$$

где $i_г$ — геометрический уклон русла потока, на рисунке 1 $i_г > 0\, i_г > 0$; F — площадь поперечного сечения потока, м^2; C — коэффициент Шези; R — гидравлический радиус сечения потока, м; α — коэффициент Кориолиса, $\alpha = 1{,}10 - 1{,}15$ [21]; g — ускорение свободного падения.

Выразим в дифференциальном уравнении (7) производную конечными разностями и подставим в него переменные из расчетной схемы на рис. 1:

$$\frac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\varDelta x}=-\frac{i_{\text{г}}+\dfrac{Q_i^2(t)}{F_i^2\cdot C^2\cdot R_i}}{1-\dfrac{\alpha}{g}\cdot\dfrac{Q_i^2(t)}{F_i^3}\cdot b}, \tag{8}$$

где F_i — площадь поперечного сечения потока на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки.

Здесь следует уточнить, что $Q_i(t)$ — это расход на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки. Площадь поперечного сечения потока на этом участке изменяется от величины $h_{i-1}(t)\ b$ до величины $h_i(t)\ b$. Поэтому величину F_i будем определять как среднее значение этих площадей:

$$F_i=b\cdot\frac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}. \tag{9}$$

Величина гидравлического радиуса потока равна отношению [15]:

$$R_i=\frac{F_i}{A_i}=b\cdot\frac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}\cdot\frac{1}{b+2\cdot\dfrac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}}, \tag{10}$$

где A_i — длина смоченного периметра потока на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки, м.

Ширина сетки промышленных вибросит — от 1 метра, толщина слоя раствора на сетке — несколько сантиметров [4]. Поэтому из выражения (10) следует, что $R_i \approx (h_{i-1}(t) + h_i(t))/2$. Подставив это значение и значение F_i из выражения (9), получим:

$$\frac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}=-\frac{i_{\text{г}}+\dfrac{Q_i^2(t)}{\left(0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right)^3\cdot b^2\cdot C^2}}{1-\dfrac{\alpha}{g}\cdot\dfrac{Q_i^2(t)}{\left(0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right)^3\cdot b^2}}. \tag{11}$$

Разрешим уравнение (11) относительно $Q_i(t)$ для $i > 1$:

$$Q_i(t)=\sqrt{\frac{\dfrac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}+i_{\text{г}}}{\left[\dfrac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\varDelta x}\cdot\dfrac{\alpha}{g}-\dfrac{1}{C^2}\right]}\cdot\left[0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right]^3\cdot b^2}. \tag{1}$$

Обсуждение и заключение. Математическая модель течения бурового раствора по сетке вибросита представляет собой систему из n уравнений (6) и n – 1уравнений (12).

Начальные условия для переменных $h_i(0)$ принять нулевыми нельзя, так как это приведет к делению на ноль в уравнениях (12). Поэтому рекомендуется принять эти условия ненулевыми, но достаточно малыми, например, $h_i(0) = 0{,}0001$.

Моделирование системы уравнений (6) и (12) можно производить в моделирующих средах, например, MATLAB с приложением Simulink или SimInTech. В любом случае надо определиться с количеством узловых точек цепной расчетной схемы на рис. 1. Пропускная способность вибросита, оснащенного конкретной сеткой, равна расходу $Q_{1\text{ зад}}$, при котором последние 20–25 % длины сетки были бы свободны от бурового раствора и использовались для обезвоживания шлама[4]. Поэтому предпоследняя узловая точка при минимальном количестве этих точек должна находится на таком же расстоянии от края сетки. Отсюда следует $\Delta x \approx 0{,}15 \cdot L$, чему соответствует семь узловых точек.

В этой работе стояла задача определения установившегося движения потока бурового раствора, а точнее его профиля. Переходный процесс этого движения автор вынужден был использовать, так как невозможно было установить левое граничное условие $h_1(\infty)$, вместо которого использовано косвенное задание этого граничного условия $Q_1(t) = Q_{1\text{ зад}}$. Окончательное количество узловых точек определится только в процессе моделирования по показателю точности профиля бурового раствора. Для этого производят моделирование математической модели (6) и (12) с n и $n + 1$ узловыми точками. Если наибольшая разность профилей потока превосходит, например, 5 % от значения высоты слоя раствора в этой точке, то увеличивают число узловых точек на единицу до $n + 2$ [22]. Затем производят моделирование с $n + 2$-ми узловыми точками и сравнивают профили

[4] *American Association of Drilling Engineers Shale Shakers and Drilling Fluid System.* Houston: Gulf Publishing Company; 1999. 335 p.

потока этого моделирования с результатом предыдущего моделирования с $n + 1$ точками. По достижению заданной погрешности в дальнейшем используют математическую модель с последним значением количества узловых точек.

Полученная математическая модель движения потока бурового раствора по сетке вибросита совместно с ранее полученной математической моделью удельной пропускной способности сетки по конкретному буровому раствору [8] позволяет обоснованно рекомендовать установку сетки с определенными размерами ячеек для различных расходов бурового раствора, истекающего из устья скважины.

Список литературы / References

1. Плетнев Н.С., Семенов Н.В. Анализ типовых конструкций вибрационных сит и особенностей их эксплуатации. В: *Материалы Всероссийской конференции с международным участием с элементами научной школы «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии»*. Томск: Издательство ТПУ; 2015. С. 632–635. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/18336/1/conference_tpu-2015-C109-118.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Pletnev NS, Semenov NV. Analysis of Standard Designs of Vibrating Screens and Features of Their Operation. In: *Proc. All-Russian Conference with International Participation with Elements of a Scientific School "Modern Problems of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoecology of Eurasia"*. Tomsk: TPU Publ.; 2015. P. 632–635. (In Russ.) URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/18336/1/conference_tpu-2015-C109-118.pdf (accessed: 29.04.2024).

2. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. *Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин*. Москва: Недра; 2003. 1007 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-bulatov-ai-proselkov-yum-shamanov-sa-tehnika-i-tehnologiya-bureniya-neftyanyh-i-.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Bulatov AI, Proselkov YuM, Shamanov SA. *Drilling Technique and Engineering of Oil and Gas Wells*. Moscow: Nedra; 2003. 1007 p. (In Russ.) URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-bulatov-ai-proselkov-yum-shamanov-sa-tehnika-i-tehnologiya-bureniya-neftyanyh-i-.pdf (accessed: 20.05.2024).

3. Рязанов А.Я. *Энциклопедия по буровым растворам*. Оренбург: Летопись; 2004. 664 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-enciklopediyapoburovymrastvoram.pdf?ysclid=lwyzjxbik6960660361 (дата обращения: 20.05.20204).

Ryazanov AYa. *Encyclopedia of Drilling Fluids*. Orenburg: Letopis'; 2004. 664 p. (In Russ.) URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002873248 (accessed: 20.05.2024).

4. Сансиев В.Г. Гидродинамические основы процесса ситовой очистки бурового раствора. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2009;75(3):41–46.

Sansiev VG. Hydrodynamic Principles of the Drilling Mud Screening Process. *Oil and Gas Studies.* 2009;75(3):41–46.

5. Сансиев В.Г. Моделирование процессов классификации и обезвоживания угольного шлама на сите грохота. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2013;(7):325–335.

Sansiev VG. Modeling of Coal Sludge Classification and Dehydration Processes on Screen. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2013;(7):325–335.

6. Головин М.В., Добик А.А., Кортунов А.В., Мищенко В.И. Современные тенденции развития вибросит для очистки буровых растворов. *Бурение и нефть.* 2014;(3):50–52. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2014-03/14 (дата обращения: 20.05.2024).

Golovin MV, Dobik AA, Kortunov AV, Mishchenko VI. Modern Development Trends of Shale Shakers for Drilling Mud Cleaning. *Drilling and Oil*. 2014;(3):50–52. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2014-03/14 (accessed: 20.05.2024).

7. Кичкарь Ю.Е., Кичкарь И.Ю., Миллер А.С. *Способ определения удельной пропускной способности сеток вибросит*. Патент РФ, № 2379127 C 1. 2010. 8 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379127C1_20100120.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kichkar YuE, Kichkar IYu, Miller AS. *Estimation of Vibration Screens Nets Specific through Capacity*. RF Patent No. 2379127 C 1. 2010. 8 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379127C1_20100120.pdf (accessed: 20.05.2024).

8. Кичкарь Ю.Е., Кичкарь И.Ю. Исследование влияния параметров колебаний рамы на удельную пропускную способность вибросита. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.* 2017;(8):37–40.

Kichkar YuE, Kichkar IYu. A Study of the Frame Vibration Parameters Influence on a Vibrating Screen Specific Capacity. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry.* 2017;(8):37–40.

9. Penagos HP, Gantiva ME, López JAA. Detection of Failures in the Operation of Shale Shaker Machines for the Separation of Solids In: *Proc. 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. New York City: IEEE; 2023. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICECCME57830.2023.10253357

10. Zhipeng Lyu, Sizhu Zhou. Design of Spatial Lissajous Trajectory Vibrating Screen. In book: Jianrong Tan (ed). *Advances in Mechanical Design*. Singapore: Springer; 2020. P. 493–498. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9941-2_40

11. Кичкарь И.Ю., Кичкарь Ю.Е., Посмитная Л.А. *Способ управления системой приводов вибросита.* Патент РФ, № 2649203. 2018. 14 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2649203C1_20180330.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kichkar YuE, Kichkar IYu, Posmitnaya LA. *Method of Vibrating Sieve Drives System Control.* RF Patent No. 2649203. 2018. 14 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2649203C1_20180330.pdf (accessed: 20.05.2024).

12. Osadolor AO, Bashir ME, Osifo TI. Development and Evaluation of a Small-Scale Shale Screening Machine. *Nigerian Journal of Scientific Research.* 2022;21(1):72–78.

13. Korostelkin AA, Filintsev AA, Novokshonov VV, Nikitin AV. On Shale Shaker's Structural Optimization and Performance Improvement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;986(1):012058. https://doi.org/10.1088/1757-899X/986/1/012058

14. Калинин А.В. Зависимость коэффициента Шези от числа Фруда. *Вестник науки и образования Северо-Запада России.* 2019;5(3):38–56.

Kalinin AV. Dependence of the Chézy Coefficient from Froud Number. *Journal of Science and Education of North-West of Russia*. 2019;5(3):38–56.

15. Васильева Т.Н., Аронов Л.В. Математическая модель режимов работы распределительной электрической сети значительной протяженности. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева.* 2012;14(2):51–54. URL: https://vestnik.rgatu.ru/archive/2_2012.pdf?ysclid=lwz0apyfjj690751007 (дата обращения: 20.05.2024).

Vasileva TN, Aronov LV. The Mathematical Model of the Long-Distance Transmission Circuits Operating Regimes. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev.* 2012;14(2):51–54. URL: https://vestnik.rgatu.ru/archive/2_2012.pdf?ysclid=lwz0apyfjj690751007 (accessed: 20.05.2024).

16. Мешалкин В.П., Чионов А.М. Компьютерное моделирование протяженных многослойно изолированных подводных газопроводов высокого давления. *Математическое моделирование.* 2017;29(8):110–122. URL: https://www.mathnet.ru/links/b0a80e5d714ee1ef962f28050fffa21f/mm3880.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Meshalkin VP, Chionov AM. Computer Modeling of the Long Multilayer-Insulated High-Pressure Subsea Gas Pipeline. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2017;29(8):110–122. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=3880&option_lang=eng (accessed: 20.05.2024).

17. Блехман И.И. *Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника.* Санкт-Петербург; Издательский дом «Руда и металлы»: 2013. 640 с.

Blekhman II. *Theory of Vibration Processes and Devices. Vibration Mechanics and Vibration Engineering*. St. Petersburg: Publ. House "Ruda i metally"; 2013. 640 p. (In Russ.)

18. Куликов В.О., Брейдо И.В. Пропуск резонансных частот вибрационного грохота с использованием преобразователя частоты Mitsubishi Electric FR серии A800. *Наука настоящего и будущего.* 2019;1:222–226. URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2019/elibrary_41177383_25140206.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kulikov VO, Breido IV. Skipping Resonant Frequencies of Vibrating Screen Using Mitsubishi Electric FR A800 Series Frequency Converter. *Science: Present and Future*. 2019;1:222–226. (In Russ.) URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2019/elibrary_41177383_25140206.pdf (accessed: 20.05.2024).

19. Булатов А.И. Системный анализ исследований течения вязко-пластичных жидкостей – глинистых и цементных растворов (ч. 1). *Бурение и нефть*. 2016;(3):18–23. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2016-03/18 (дата обращения: 20.05.2024).

Bulatov AI. System Analysis of Current Research Visco-Plastic Liquids – Clay and Cement Mortars (Part 1). *Drilling and Oil*. 2016;(3):18–23. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2016-03/18 (accessed: 20.05.2024).

20. Байгалиев Б.Е., Гортышов Ю.Ф., Самойленко А.В. Исследование влияния откосов на гидравлические сопротивления трапецеидальных русел. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* 2012;(2):35–43.

Baigaliev BE, Gortyshov YuF, Samoilenko AV. Investigation of the Slope Influence on Hydraulic Resistances of Trapezoidal Channels. *Vestnik of Tupolev KNRTU*. 2012;(2):35–43.

21. Абдюкова Р.Я., Хабибуллин М.Я. Расчет геометрических размеров клапана бурового насоса и определение высоты подъема тарели. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса.* 2015;(5):15–18.

Abdyukova RYa, Habibullin MYa. Calculation of Geometric Dimensions of a Mud Pump Valve and Determination of the Plate Lifting Height. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2015;(5):15–18.

22. Меретуков З.А., Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики. *Новые технологии.* 2012;(1):36–41.

Meretukov ZA, Zaslavets AA, Koshevoi EP, Kosachev VS. Methods of Solving Differential Equations of Hydrodynamics. *New Technologies*. 2012;(1):36–41.

Об авторе:

Илья Юрьевич Кичкарь, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов института компьютерных систем и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, ResearcherID, kichkar@ya.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Ilia Yu. Kichkar, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Production Automation Department, Institute of Computer Systems and Information Security, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ResearcherID, kichkar@ya.ru

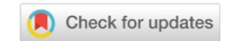
Conflict of Interest Statement: **the author claimed no conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 19.06.2024
Принята к публикации / Accepted 28.06.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.05
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-255-263

Оригинальное теоретическое исследование

Управление качеством при разработке программного обеспечения



EDN: JBGRGQ

М.Д. Бируля
EPAM Systems Sp z o.o., г. Краков, Республика Польша
✉ martinbirulia@gmail.com

Аннотация

Введение. В научной литературе рассматриваются разные подходы к менеджменту качества в сфере информационных технологий (ИТ). Проработаны вопросы выявления и исправления дефектов, показаны возможности их минимизации. Есть материалы об управлении качеством в сложных технологических процессах. Доказано, что работа с качеством цифровых продуктов требует в числе прочего прояснения вопросов качества кода. При этом нет детального описания управления качеством на каждом этапе жизненного цикла ИТ-продукта, включая тестирование. Отметим, что координация релизов (выпусков) программного обеспечения тесно связана с управлением качеством, однако данный процесс редко или фрагментарно рассматривается в литературе. К тому же не учитывается взаимодействие процессов, поэтому нет комплексного представления об управлении качеством при создании, тестировании и доработке программного обеспечения (ПО). Данное исследование призвано восполнить указанные пробелы. Его цель — представить комплексный подход, связывающий теорию, практику и методы управления качеством ПО.

Материалы и методы. Исследована, проанализирована и отреферирована профильная теоретическая и прикладная литература. Задействован профессиональный опыт автора в управлении качеством ИТ-продуктов. Учтены практики глобальных поставщиков цифровых товаров и услуг. Автор использовал эти материалы и методы для детальной проработки вопросов тестирования ПО и развертывания кода.

Результаты исследования. Сформирована, описана и представлена в виде схемы комплексная модель управления качеством при создании ПО. Выявлены ее взаимосвязи с моделью менеджмента проектов и жизненным циклом продукта, а именно: анализом, дизайном, разработкой, тестированием, развертыванием и поддержкой. Указаны принципы управления качеством на каждой из этих стадий. Систематизированы и представлены в виде схемы процессы и проверки при развертывании кода. Показаны их особенности в трех средах: при разработке, тестировании и производстве.

Обсуждение и заключение. Алгоритм позволяет специалистам по качеству выстроить последовательность действий для исключения в будущем выявленных дефектов, понимания ситуации, когда можно (или нельзя) развертывать код и определения момента, когда следует передать ПО пользователю. Кроме того, предложенная схема может быть базой для автоматизации развертывания кода. Решение позволит сократить время на разработку. Как следствие, продукт быстрее выйдет на рынок, что ускорит окупаемость затрат. Внедрение в производственную практику ИТ-компаний модели, созданной в рамках данной научной работы, предполагает стратегические изменения. Их реализация требует значительных затрат времени и других ресурсов, поэтому общий процесс трансформаций следует разбить на части. Предложенный подход адаптируется под нужды различных организаций и продуктов. Можно работать с отдельными компонентами, чтобы создать оптимальный план для достижения целей по управлению качеством.

Ключевые слова: развертывание кода, управление качеством в ИТ-сфере, жизненный цикл ИТ-продукта, тестирование ИТ-продукта, релиз программного обеспечения

Благодарности. Автор выражает благодарность ведущим организациям в сфере разработки программного обеспечения — EPAM Systems, Amazon и Google за их практики, которые анализировались при подготовке статьи. Особая благодарность компании Project Management Institute за обновление подходов к управлению проектами.

Для цитирования. Бируля М.Д. Управление качеством при разработке программного обеспечения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):255–263. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-255-263

Original Theoretical Research

Quality Management in Software Development

Martin D. Birulia
EPAM Systems Sp z o.o., Kraków, Republic of Poland
✉ martinbirulia@gmail.com

Abstract

Introduction. The scientific literature examines various approaches to quality management in information technology (IT). The issues of identifying and correcting defects are worked out, and the possibilities for minimizing them are shown. There are materials on quality management in complex engineering processes. At the same time, there is no detailed description of quality management at each stage of the IT product life cycle, including testing. It should be noted that the coordination of software releases is closely related to quality management, but this process is rarely or fragmentarily considered in the literature. Additionally, the interprocess communication is not taken into account; therefore, there is no comprehensive understanding of quality management in the creation, testing and refinement of software. This study is designed to fill these gaps. The research is aimed at presenting a comprehensive approach that links the theory, practice and methods of software quality management.

Materials and Methods. Theoretical and applied literature on the subject were studied, analyzed, and reviewed. The author's professional background in managing the quality of IT products was used. The practices of global suppliers of digital goods and services were taken into account. The author has used these materials and methods to study in detail the issues of software testing and code deployment.

Results. A comprehensive model of quality management in software development is elaborated, described and presented in the form of a diagram. Its interconnections with the project management model and the product life cycle, namely: analysis, design, development, testing, deployment, and support, are identified. Principles of quality management at each of these stages are specified. The processes and checks during code deployment are systematized and presented in the form of a diagram. Their features are shown in three environments: during development, testing, and production.

Discussion and Conclusion. The algorithm allows quality experts to build the sequence of actions to eliminate detected defects in the future, understand the situation when it is possible (or impossible) to deploy code, and determine the moment when the software should be transferred to the user. In addition, the proposed scheme can be the basis for automating code deployment. The solution will reduce development time. As a result, the product will enter the market faster, which will speed up the payback of costs. The implementation of the model created within the framework of this scientific work into the production practice of IT companies presupposes strategic changes. Their implementation requires significant time and other resources; therefore, the overall transformation process should be divided into parts. The proposed approach is adaptable to the needs of various organizations and products. You can work with individual components to create an optimal plan for achieving quality management goals.

Keywords: code deployment, quality management in IT, IT product life cycle, IT product testing, software release

Acknowledgments. The author appreciates the leading software development organizations, such as EPAM Systems, Amazon, and Google, for their practices, which were analyzed under the preparation of this article. Special thanks to Project Management Institute for updating approaches to project management.

For Citation. Birulia MD. Quality Management in Software Development. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):255–263. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-255-263

Введение. В условиях высокой конкуренции на рынке программного обеспечения (ПО) пользователи ориентируются не только на маркетинговую, но и на потребительскую ценность товара, обращают внимание на удобный интерфейс, оперативность и стабильность работы. Все это следует учитывать производителям и подразделениям софтверных компаний, которые работают с качеством. В открытом доступе достаточно теоретических и прикладных публикаций, посвященных управлению качеством и автоматизации этих процессов. Авторы рассматривают новации в этой сфере, сравнивают их с традиционными практиками.

Работа с дефектами (в частности, их раннее выявление и анализ) позволяет предотвращать ошибки на этапе разработки софта. При таком подходе сокращаются затраты времени, денег и других ресурсов на исправление логических, синтаксических, компиляционных и других ошибок ПО. Улучшается качество продукта, повышается его ценность в плане надежности, легкости обслуживания и экономичности [1]. В [2] описано управление качеством в сложных технологических процессах. Автор показывает, как выявить взаимосвязь между технологией и качеством. По его предположению, существует информационное соответствие между вероятностыми моделями технологии и качеством. Из [3] известно, что в сфере информационных технологий (ИТ) увеличение бюджета на 49 % приводит к созданию новых моделей управления качеством. В качестве примера можно назвать стандарты ISO/IEC [4]. В [5] показано, как управление качеством влияет на производственные процессы.

Важная и сложная задача — автоматизация контроля процессов, от которых зависит качество. Ключевая форма контроля — статистическая. Она работает с индикаторами, критичными для качества конечного продукта (от англ. critical to quality (CTQ)). Эти показатели отслеживаются и сравниваются с целевыми значениями. В результате получают заключение о статистической управляемости или неуправляемости процесса [6].

Анализ жизненного цикла разработки ПО рассмотрен во многих источниках, однако нет детального описания управления каждым этапом жизненного цикла, включая тестирование [7].

Отдельное направление исследований — взаимосвязи между основными инструментами менеджмента качества и их влияние на операционные, финансовые и рыночные показатели компании-производителя. При этом интегрированное использование и управление таким инструментарием — актуальная задача [8].

В [9] показано, как различные практики управления качеством влияют на инновации в компаниях, сертифицированных по ISO 9001. Некоторые исследования посвящены учету практических рекомендаций при разработке жизненного цикла продукта. Из [10] известно, что 60–80 % потенциальных ошибок при разработке инновационных продуктов связаны с неправильно понятыми требованиями. Авторы [11] утверждают, что при обсуждении качества продукта следует прояснить вопросы качества кода, стоимости достижения заданного качества и времени выхода на розничный рынок. В вопросах автоматизации качества особая роль отводится непрерывной интеграции (или непрерывной доставке) программного кода [12]. Так называется процесс, который обеспечивает постоянное обновление кода при разработке софтверного продукта. В [13] даются рекомендации, как учитывать уровень конкуренции в отрасли при последовательном выпуске новых версий продукта.

Каждая из перечисленных работ рассматривает разные элементы управления качеством. При этом упускается из вида системное и структурное взаимодействие процессов. Как следствие, нет комплексного представления об управлении качеством при создании, тестировании и доработке ПО. Данное исследование призвано восполнить указанный пробел. Описывается комплексный подход, связывающий теорию, практику и методы управления качеством в ИТ-сфере. Отметим также, что благодаря гибкости предложенной модели ее можно адаптировать под нужды конкретного производителя.

Роль управления качеством при разработке ПО. Качество — это комплексная категория, которую можно рассматривать с разных точек зрения: философской, социальной, технической, экономической, правовой [1]. В данной статье качество обсуждается как совокупность свойств товара или услуги, способных в той или иной степени удовлетворять потребности целевой аудитории [3]. Продукт рассматривается как суммарный результат разных видов деятельности, причем у каждой — свои входные данные (параметры) которые в результате производственного процесса превращаются в выходные (ценность). Продукт — это совокупность ценностей. Он предназначен для удовлетворения потребностей, которые определяются заранее, при маркетинговой разработке товара или услуги. О качестве продукта судят по тому, насколько реальная удовлетворенность потребителя совпадает с запланированной.

В области информационных технологий основными считаются две группы требований к продукту (потребности пользователей): функциональные и нефункциональные. Как и на любом рынке, при розничной реализации ИТ-решений точно выстроенная работа с ценностью обеспечивает лояльность целевой аудитории, а значит, повышает рентабельность выпуска программного обеспечения, приложений и аналогичной продукции.

Реализованные дефектные товары портят имидж производителя [8]. Негативные отзывы распространяются в сети и мессенджерах. Потеря пользователей ведет к ухудшению финансовых показателей. Кризис качества может обернуться банкротством производителя.

В [6] показано, что менеджмент качества через управление процессами связан со всеми пятью типами инноваций. Перечислим факторы, которые их формируют:

- новая техника и технологии;
- продукция с новыми свойствами;
- новое сырье;
- новая организация производства;
- новые рынки сбыта.

Материалы и методы. Научные изыскания, результаты которых обобщены в представленной статье, базировались на глобальной практике производства и реализации софтверных товаров и услуг. Кроме того, изучалась литература, посвященная созданию и продвижению ИТ-решений. Теория соотнесена с практикой деятельности крупнейших разработчиков программного обеспечения. Теоретическая часть дает представление о специфике разных методов управления качеством. Приводятся примеры их практического использования при управлении жизненным циклом продукта. С этой точки зрения рассмотрены некоторые подходы к менеджменту проектов — гибкие, каскадные (второе название — водопадные) и гибридные.

Исследуется организация и координация релизов (выпусков) программного обеспечения. Это тесно связано с управлением качеством, однако редко или фрагментарно рассматривается в литературе.

Практика реализации крупных проектов соотносится с хорошо изученной теорией управления качеством. Это позволяет точно определить, как крупные организации задействуют теоретическую базу для обеспечения качества информационных продуктов (а в итоге — для их коммерческой успешности).

Отметим, что автор данной статьи имеет опыт управления софтверными продуктами, и его профессиональные знания тоже использовались в качестве материалов исследования.

Виды тестирования программного обеспечения. Как показано в [7], на рынке (то есть вне компании-производителя) восприятие качества (как элемента конкурентного преимущества) определяется в процессе проектирования продукта, статистического контроля и обратной связи. Представление о качестве внутри компании зависит от того, какой процент продукции проходит все проверки и в итоге не требует доработки. Этот показатель связан главным образом с управлением процессами, а не со статистическим контролем и обратной связью.

Важно, чтобы элементы системы, влияющие на качество, поддерживались высшим менеджментом и согласовывались с управлением персоналом. Кроме того, практики работы с качеством и его индикаторы нужно учитывать при настройках внутрикорпоративных отношений, взаимосвязей с поставщиками и другими контрагентами.

Для определения качества будущей и готовой продукции проводится тестирование, поэтому важно понимать, что именно является объектом испытаний. В данном случае недостаточно сказать: «продукт». Это слишком общее понятие, его следует конкретизировать. Часто к продукту предъявляют определенные функциональные и нефункциональные требования. В первом случае речь идет о наборе функций, которые система должна выполнять определенным образом. Например, при наборе адреса в строке браузера должна появиться соответствующая страница. Выбор определенных элементов меню на этой странице должен вести к заранее известным результатам. При этом может быть несколько сценариев взаимодействия с сайтом — например, для зарегистрированных и незарегистрированных пользователей. Так, большинство сетевых ресурсов при регистрации открывают возможность комментировать посты, получать подборки материалов и пр.

Как ясно из названия, нефункциональные требования не связаны с функциями, доступными пользователю. При этом они часто дают потребителю более весомые преимущества, чем функциональные. Речь может идти об определенном уровне защиты данных, комплексном сборе аналитики, соблюдении законодательства (например, о защите персональных данных).

Соответствие продукта функциональным и нефункциональным требованиям проверяется по-разному.

На рис. 1 представлена пирамида тестирования функциональных требований. Виды испытаний ранжированы по важности, скорости, стоимости и доле успешных проверок.



Рис. 1. Виды тестирования [14]

Юнит-тестирование, или модульное тестирование — это проверка корректности отдельных модулей исходного кода программы, отдельных функций приложения или сервиса. В результате устанавливается, работоспособен ли код, дает ли он правильные результаты при различных входных данных, соответствует ли логика ожидаемой. Пример такого теста: при сложении двух чисел должна получиться их сумма. В функцию вводятся входные значения, необходимые для проверки. Юнит-тест пройден, если ожидаемый результат функции равен фактически полученному. Для расчета метрики соотносят количество строк кода, прошедших тест, и общее число строк кода в репозитории. Лучшим индикатором считается 80 %. Он показывает, что логика любой функции соответствует ожидаемой на 80 % еще до того, как начинается следующая стадия тестирования. Значит, проблемы выявляются довольно рано и решаются гораздо дешевле и быстрее. Поэтому юнит-тест — первая ступень в пирамиде функционального тестирования. Его отсутствие (как и любых других видов тестирования) создает пробелы, накопление которых ведет к необоснованному удорожанию проекта [15].

Интеграционное тестирование. На следующем этапе тестируется взаимодействие компонентов будущего приложения. Проверяется интеграция модулей. Эти испытания сложнее юнит-тестирования, т. к. проверяется возможность выполнить последовательные действия в различных компонентах. Пример: пользователь входит в систему — перенаправляется на главную страницу — размещает объявление. То есть тестируются сразу несколько модулей. Ниже перечислены основные варианты интеграционного тестирования.

«Большой взрыв». Все компоненты собирают и совместно испытывают. Это позволяет выполнять тестирование один раз после разработки. Однако при большом количестве модулей какой-то можно упустить из виду, и это слабое место метода. К тому же увеличивается петля обратной связи, так как тестируются готовые решения, когда разработка завершена. Отметим также сложности с локализацией ошибки. Они объясняются тем, что придется проанализировать весь процесс (сценарий) разработки, чтобы узнать причину проблемы. Это значит, что время тестирования увеличится. Метод однозначно удобен для небольших систем.

Инкрементальный подход. В отличие от «большого взрыва» испытания можно начинать, даже если к нему готовы всего два модуля, и добавлять остальные по мере их разработки. В этом случае проще локализовать исходные ошибки, сокращается петля обратной связи. Не нужно ждать, пока будут готовы все сервисы. А значит, проверка начнется и завершится раньше. Устранение дефектов обойдется дешевле. Инкрементальное тестирование можно выполнять двумя способами: снизу вверх и сверху вниз.

Интеграция снизу вверх. Сначала тестируются самые некритичные модули, затем более значимые и наконец — базовые. Следовательно, верхние компоненты нельзя проверить, пока нет данных о качестве элементов нижнего уровня. Это увеличивает время между разработкой и стартом тестирования.

Интеграция сверху вниз. Тестирование начинается с наиболее значимых уровней приложения. В данном случае испытание модулей нижних уровней может быть не вполне адекватным. Однако даже если впоследствии это обернется проблемами, они будут некритичными.

Гибридная интеграция. Модули разных уровней тестируются совместно. Успешность такой проверки определяется тем, понимает ли исполнитель архитектуру приложения и может ли определить оптимальный подход к конкретному продукту [12].

Системное тестирование. Все компоненты программы испытываются как единое приложение. Специалист должен удостовериться, что продукт корректно отрабатывает различные сценарии и ситуации. Этот вариант может включать тестирование нефункциональных требований. Такой подход основывается на требованиях или на базе сценариев использования. В любом случае результатом будут тестовые сценарии. Их успешное прохождение подтверждает, что система работает именно так, как ожидается.

Системное тестирование требует значительного времени, поскольку с развитием продукта растет количество возможных вариантов ее использования. Следовательно, софт нужно своевременно обновлять. Этим занимается служба поддержки. При каждом обновлении продукта необходимо проверить, работают ли ранее протестированные функции. Этот процесс называется регрессионным тестированием. Если ранее тесты работали, а после ввода новой функции перестали, значит, есть проблема. Процедура такой проверки иногда занимает колоссальное количество рабочего времени инженеров по тестированию, и они не успевают писать новые тесты. Этим обусловлена важность автоматизации испытаний, которые выполняются вручную. При таком подходе тестирование оптимизируется до простого анализа результатов автоматических проверок. Лучший вариант — это 100-процентная автоматизация. Достичь такого показателя не всегда возможно, поскольку некоторые тесты не подлежат автоматизации из-за их сложности [16].

Приемочное тестирование. На последнем этапе продукт тестируют ключевые специалисты и заказчики. Они в режиме реального времени проверяют, насколько реализованы их ожидания и требования. Выясняется, с какими проблемами столкнется будущий пользователь. Все ли функции работают, как было задумано, удобен ли интерфейс, насколько вероятны ошибки и некорректные операции. В итоге проект принимается или не принимается. Приемка — это заключительный этап тестирования.

Исправление недоработок и дефектов, обнаруженных на данном этапе, обойдется особенно дорого, поскольку для решения проблемы придется пройти весь процесс с самого начала — от разработки и юнит-тестирования до полной проверки системы. Следовательно, на более ранних стадиях нужно приложить все усилия, чтобы избежать такой ситуации.

Нефункциональное тестирование проверяет приложение на:

- производительность;
- надежность;
- совместимость;
- безопасность;
- полезность;
- масштабируемость.

Для проверки этих свойств используют более 15 видов тестирования. Назовем наиболее распространенные.

Тестирование производительности. Оценивается скорость и эффективность работы приложения или системы. Основное внимание уделяется скорости ответа на запрос пользователя. Например, тестирование может включать оценку времени загрузки основной страницы сайта. Определяются целевые показатели производительности, и с ними сравниваются реальные результаты.

Нагрузочное тестирование. Выясняется максимальная нагрузка, которую выдерживает система без отказа или существенного ухудшения производительности. Например, для сайта это означает определение количества пользователей, которые могут одновременно взаимодействовать с платформой, прежде чем произойдут сбои или отказы.

Тестирование отказоустойчивости. Испытывается способность системы или приложения сохранять работоспособность при сбоях или непредвиденных ситуациях. Цель такого тестирования — обнаружение уязвимостей и разработка мероприятий для обеспечения непрерывной работы.

Тестирование совместимости. Проверяется совместимость приложения или системы с другим программным обеспечением, с различными операционными системами, браузерами и устройствами.

Тестирование безопасности. Оценивается уровень защищенности системы или приложения от атак и потенциальных угроз безопасности. Выясняется, есть ли уязвимости, анализируются защитные механизмы и эффективность мер безопасности.

Тестирование аварийного восстановления. Определяется способность системы или приложения восстанавливаться после сбоев, отказов или других чрезвычайных ситуаций. Цель — проверка эффективности процедур восстановления и минимизация времени простоя в случае аварийных ситуаций.

Результаты исследования. В рамках представленного исследования сформирована комплексная модель управления качеством при создании ПО. Описаны ее взаимосвязи с жизненным циклом разработки, релизами, издержками и моделью менеджмента проектов (гибкой, каскадной или гибридной).

Процесс управления качеством в жизненном цикле разработки ПО. Стандартная разработка цифровых продуктов состоит из шести производственных процессов, или этапов. Каждый из них должен вносить вклад в обеспечение качества (рис. 2).

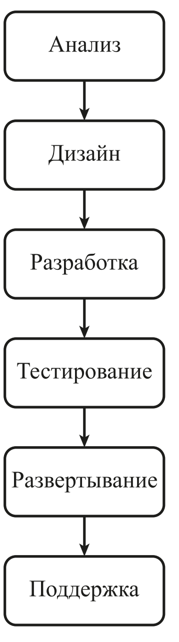


Рис. 2. Жизненный цикл разработки программного обеспечения [17]

Анализ и определение требований к продукту. Исследуются проблемы, предлагаются решения с учетом заявленных требований. Этот процесс задает основные показатели для проверки готового продукта. В зависимости от модели разработки описываются и согласовываются стратегия, подходы и инструменты тестирования. Один из документов называется «Видение продукта и его возможности». В нем фиксируются выявленные проблемы, отмечаются связи с бизнес-планом, описывается конъюнктура рынка, перечисляются основные функциональные и нефункциональные требования. Документ утверждают стороны-партнеры (то есть представители исполнителя и заказчика). При необходимости в текст вносят корректировки. На этом этапе важно привлечь специалистов по безопасности и архитектуре приложений, которые помогут точно определить нефункциональные требования, важные для будущего тестирования.

Дизайн архитектурного и визуального решения. С учетом требований, выявленных на предыдущей стадии, вырабатывается архитектурное решение, обеспечивающее их выполнение, и дизайн пользовательского интерфейса. Все это — ориентир для команды разработчиков, которым предстоит тестировать и при необходимости корректировать продукт.

Разработка. Создается код для решения задач и проблем будущих пользователей. Для проверки логики отдельных функций пишутся юнит-тесты. Основная цель — достичь нужного показателя покрытия кода тестами (не менее 80 %). Однако широко применяются и другие практики — такие как аудиты кода (code review). В этом случае код проверяют другие члены команды, и на ранних стадиях разработки выявляются ошибки, недочеты, пропуски и уязвимости. Ревьюеры могут оставлять комментарии к конкретным строкам кода, указывая на необходимость переработки. С точки зрения качества продукта идеальный сценарий — двойное код-ревью, когда минимум два не связанных с автором специалиста рассматривают и комментируют код.

Кроме юнит-тестирования и код-ревью необходимо использовать линтеры. Это автоматизированные инструменты, которые анализируют код в реальном времени, обнаруживают недочеты, ошибки и предлагают пути их исправления. Можно использовать и другие виды тестирования в зависимости от стратегии и требований к продукту.

Тестирование. Инженеры по тестированию разрабатывают адекватные задачам тест-сценарии. Как правило, они пишутся вручную, что замедляет реализацию данного этапа. Целесообразно автоматизировать процесс, однако это не всегда возможно. На данной стадии специалисты проверяют и при необходимости перепроверяют результаты ручных и автоматизированных тестов. Особое внимание уделяется случаям, когда автоматические тесты выявляют ошибки. Важно установить, реальная ли это ошибка, или ложноположительный результат. Обнаруженные дефекты ранжируются в зависимости от их важности для системы или пользователей, а затем передаются разработчикам для исправления. После устранения дефектов полезно провести анализ корневой причины проблемы с использованием метода RCA (англ. root cause analysis — анализ причин). Это позволяет разработать меры по предотвращению проблем в будущем, добавить новые юнит- или интеграционные тесты. Для полного понимания причин проблемы рекомендуется использовать технику «5 почему» (англ. 5 Why's). Схема метода выглядит так: формулируется проблема и задается вопрос: «Почему это случилось?». На него следует ответ, описывающий определенный факт или ситуацию. Вновь задается вопрос: «А это почему случилось?». И так пять раз. Пять ответов позволяют приблизиться к пониманию причин проблемы.

Тестирование — это масштабный процесс. Ниже перечислены его основные этапы.

1. Настройка и конфигурация окружения для тестирования.
2. Написание и выполнение ручных тест-сценариев.
3. Автоматизация ранее написанных ручных тест-сценариев.
4. Проверка результатов автоматических тестов.
5. Поддержка актуальности автоматических тест-сценариев и исправление ошибок.
6. Фиксация дефектов.
7. Документирование дефектов.
8. Анализ причин дефектов.
9. Разработка шагов по предотвращению появления дефектов в будущем.

Развертывание кода приложения. Программное обеспечение требует различных сред для развертывания. Важно хорошо представлять, как непрерывная интеграция и непрерывное развертывание (англ. continuous integration and continuous deployment, CI/CD) обеспечивают стабильное качество ПО при минимальных трудозатратах. Этому способствует в первую очередь автоматизация развертывания кода — перенос его изменений из одной среды в другую. Процесс делится на этапы, которые зависят от продукта, организации и принятых стандартов.

Степень автоматизации, количество и строгость проверок определяют ожидаемое качество продукта до того, как код станет доступен конечным пользователям. На рис. 3 показана возможная схема развертывания кода. При высоком уровне автоматизации трудозатраты будут минимальными, придется выполнить вручную всего несколько проверок.

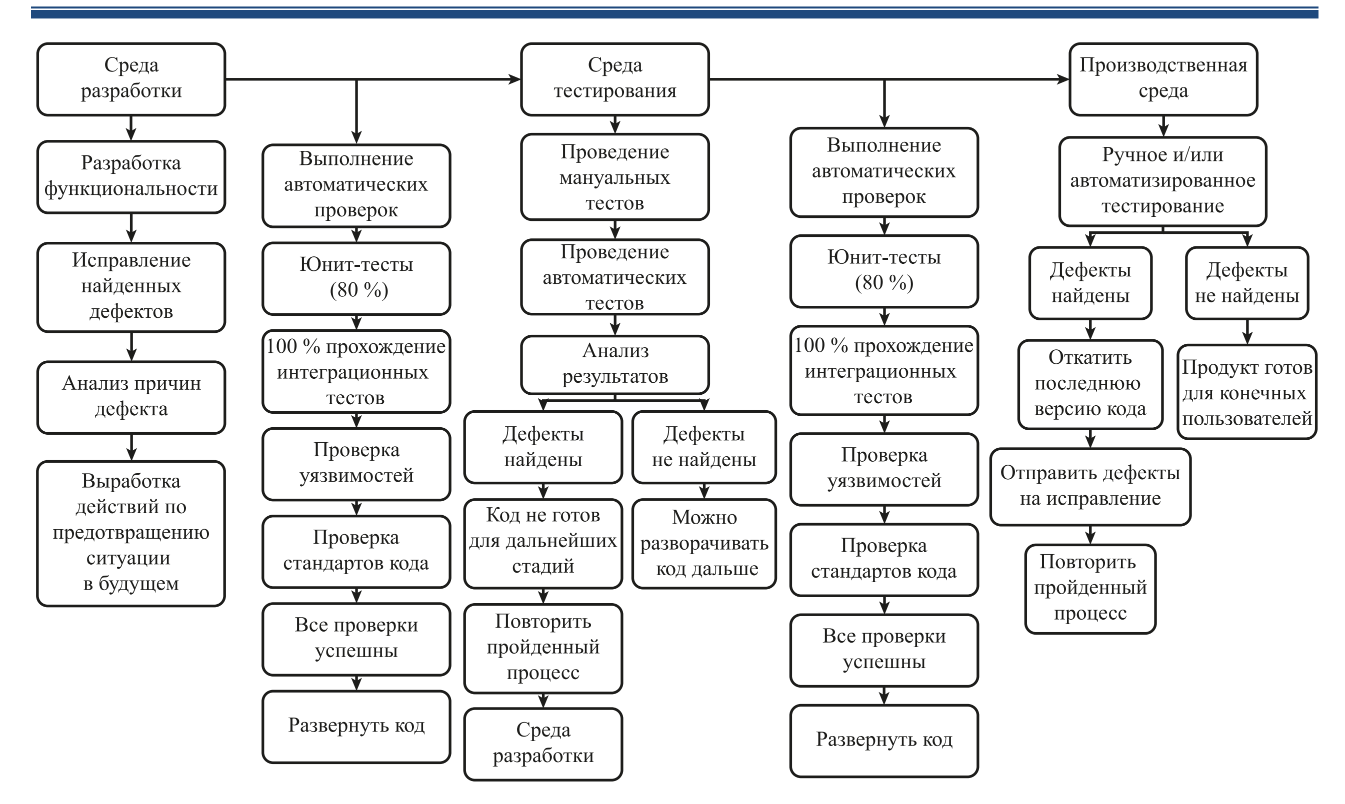


Рис. 3. Схема процессов и проверок при развертывании кода

Следуя представленной схеме, можно контролировать качество и автоматизировать развертывание кода. Это позволит сократить время на разработку, а значит, продукт быстрее выйдет на рынок.

Поддержка продукта. На этом этапе необходимо выстроить обратную связь с пользователями: проводить опросы, собирать и анализировать метрики. Все это будет базой для задач и идей по улучшению ПО. Предположения следует подтвердить A/B тестами, т. е. сравнением вариантов продукта. Важно также обеспечить обратную связь с командой поддержки, которая напрямую контактирует с пользователями. Именно эти специалисты делятся ценными наблюдениями, передают пожелания целевой аудитории, на основании которых проводится анализ и формируются новые стратегии. Как видим, процесс не завершается, даже если продукт полностью готов. Появляются новые данные для анализа, сбора требований и развития цифрового товара или услуги.

Обсуждение и заключение. Представленная в статье модель управления качеством адаптируется под нужды различных организаций и продуктов. Можно дополнительно изучить ее компоненты, чтобы создать оптимальный план для достижения целей, связанных с управлением качеством. При этом следует иметь в виду ключевые факторы коммерческого успеха ПО: разработчики и тестировщики должны критически мыслить, наладить сотрудничество и постоянно совершенствовать процессы.

Предложенная модель предполагает стратегические изменения, реализация которых требует значительного времени, поэтому общий процесс трансформаций следует разбить на части.

Изложенный материал будет полезен менеджменту, который курирует вопросы качества, касающиеся общей стратегии компании и оптимизации отдельных процессов.

Отметим, что для достижения значимых результатов необходимы высокая степень автоматизации тестирования, развитая инженерная культура и значительные затраты на создание и поддержку инфраструктуры.

Список литературы / References

1. Suma V, Gopalakrishnan Nair TR. Defect Management Strategies in Software Development. In book: *Recent Advances in Technologies*. Vienna: Intec Web Publishers; 2009. P. 379–404. https://doi.org/10.48550/arXiv.1209.5573

2. Кузнецов Л.А. Управление качеством в сложных технологических процессах. *Проблемы управления.* 2007;(3):47–53.

Kuznetsov LA. Quality Management in Complex Processes. *Control Sciences.* 2007;(3):47–53.

3. Munoz M, Mejia J, Ibarra S. Tools and Practices to Software Quality Assurance: A Systematic Literature Review. In: *Proc. 13th Liberian Conference on Information Systems and Technologies* (*CISTI*). New York City: IEEE; 2018. P. 1–6. https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399334

4. Carrozza G, Pietrantuono R, Russo S. A Software Quality Framework for Large-Scale Mission-Critical Systems Engineering. *Information and Software Technology.* 2018;102(3):100–116. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.05.009

5. Vallabhaneni RS. Corporate Management, Governance, and Ethics Best Practices. Ch. 7. In book: *Quality-Management Best Practices*. Hoboken, NJ: Wiley; 2008. 456 p. https://doi.org/10.1002/9781119196662.ch7

6. Размочаева Н.В., Семенов В.П., Безруков А.А. Исследование статистического управления процессами в задачах автоматизации процессов. В: *Материалы XII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям*. 2019;1:355–358. URL: https://scm.etu.ru/assets/files/2019/scm2019/papers/7/355.pdf (дата обращения: 20.06.2024).

Razmochayeva NV, Semenov VP, Bezrukov AA. Investigation of Statistical Process Control in Process Automation Tasks. In: *Proc. XII International Conference on Soft Computing and Measurements.* 2019;1:355–358. (In Russ.) URL: https://scm.etu.ru/assets/files/2019/scm2019/papers/7/355.pdf (accessed: 20.06.2024).

7. Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., Евсеев В.В. Анализ жизненного цикла разработки программного обеспечения для корпоративных информационных систем. *Восточно-Европейский журнал технологий предприятий*. 2010;6(8):25–27.

Nevlyudov ISh, Andrushevich AA, Evseyev VV. Software Development Life Cycle Analysis for Enterprise Information Systems. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies.* 2010;6(8):25–27. (In Russ.)

8. Kaynak H. The Relationship between Total Quality Management Practices and Their Effects on Firm Performance. *Journal of Operations Management.* 2003;21(4):405–435. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(03)00004-4

9. Dong-Young Kim, Vinod Kumar, Uma Kumar. Relationship between Quality Management Practices and Innovation. *Journal of Operations Management*. 2012;30(4):295–315. https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.02.003

10. Ramasubbu N, Kemerer CF. Integrating Technical Debt Management and Software Quality Management Processes: A Normative Framework and Field Tests. *IEEE Transactions of Software Engineering*. 2019;45(3):285–300. https://doi.org/10.1109/TSE.2017.2774832

11. Alhassan A, Alzahrani W, AbdulAziz A. Total Quality Management for Software Development. *International Journal of Computer Applications.* 2017;158(5):38–44. URL: https://www.ijcaonline.org/archives/volume158/number5/alhassan-2017-ijca-912850.pdf (accessed: 20.06.2024).

12. Mohamed SI. Software Release Management Evolution — Comparative Analysis across Agile and DevOps Continuous Delivery. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2016;3(6):52–59. URL: https://ijaers.com/detail/software-release-management-evolution-comparative-analysis-across-agile-and-devops-continuous-delivery/ (accessed: 20.06.2024).

13. Adelman D, Mancini A. Dynamic Release Management: A Market Intensity Approach. *Chicago Booth Research Paper*. 2016;(16–19):42. http://doi.org/10.2139/ssrn.2847264

14. Radziwill N, Freeman G. Reframing the Test Pyramid for Digitally Transformed Organizations. *Semantic Scholar*. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/62a5c71b33437bc40e146a13a6fb95371b866262 (accessed: 22.06.2024).

15. Alves NSR, Mendes TS, Mendonca MG, Spinola RO, Shull F, Seaman C. Identification and Management of Technical Debt: A Systematic Mapping Study. *Information and Software Technology.* 2016;70(2):100–121. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.10.008

16. Concas G, Marchesi M, Murgia A, Tonelli R, Turnu I. On the Distribution of Bugs in the Eclipse System. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2011;37(6):872–877. http://doi.org/10.1109/TSE.2011.54

17. Lemke G. The Software Development Life Cycle and Its Application. *Senior Honors Theses and Projects*. 589. Ypsilanti, MI: Eastern Michigan University; 2018. URL: https://commons.emich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1588&context=honors (accessed: 22.06.2024).

Об авторе:

Мартин Дмитриевич Бируля, менеджер проектов EPAM Systems Sp z o.o. (Польша, 31–553, г. Краков, ул. Опольска, 114), SPIN-код, ORCID, martinbirulia@gmail.com

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Martin D. Birulia, project manager, EPAM Systems Sp z o.o. (114, Opolska Str., Krakow, 31–553, Poland), SPIN-code, ORCID, martinbirulia@gmail.com

Conflict of Interest Statement: **the author claimed no conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 30.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 20.07.2024
Принята к публикации / Accepted 27.07.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 004.032.26, 531.3

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Определение динамических напряжений и перемещений при действии ударной нагрузки на двухслойную конструкцию в процессе индентирования



EDN: VVRPYB

Н.Е. Бабушкина ✉, **А.А. Ляпин**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация



✉ copybird@yandex.ru

Аннотация

Введение. Многие исследователи надежности строительных конструкций уделяют внимание твердости — важной характеристике конструкционного материала. Ее определяют индентированием — вдавливанием наконечника инструмента в поверхность. Исследуются преимущества методов динамического индентирования, распределение интенсивности напряжений на поверхности и внутри образца. Однако мало изучено состояние слоистых материалов при ударе. Цели представленной работы — рассмотреть индентирование для двухслойного образца и определить чувствительность верхнего слоя к прочности подложки. Это позволит выявить значимые характеристики прочностных свойств однородных и неоднородных конструкций.

Материалы и методы. Использовали упруго-пластическую модель поведения материала и схему ударного индентирования, которая учитывает массы индентора и ударника, сцепленных линейными пружинами. Поверхность индентора — коническая, угол раскрытия — 120°. Удар моделировали в системе Matlab. Конечноэлементную модель в Ansys APDL применили для верификации данных и анализа результатов эксперимента. Для расчетов взяли традиционные модели теории упругости. Поведение материала в области пластического деформирования описали с помощью опций мультилинейного изотропного упрочнения и критерия пластичности Мизеса.

Результаты исследования. Приводятся итоги сопоставления трех вариантов варьирования уровня предела текучести в нижнем слое: когда предел текучести в нижнем слое вдвое меньше верхнего, равен ему и вдвое больше. Проанализированы перемещения в разных точках наблюдения для образцов с верхним слоем 2 мм и 1 мм. В первом случае при горизонтальном сдвиге не меняются показатели перемещений внутри образца, если уровень предела текучести вдвое ниже или выше, чем в верхнем. При равенстве этих показателей разница становится заметной. Во втором случае (слой 1 мм) разница перемещений видна во всех точках наблюдения. Так можно обоснованно заключить, что конструкция с меньшим верхним слоем более чувствительна к ударному воздействию. В ходе изысканий стало известно, что в зоне 2 мм совершаются колебания, связанные с переходом в зону пластичности, ниже этой зоны — упругие затухающие колебания. Решили задачу классификации для верхнего слоя материала с меняющимися характеристиками основания. Показатель для сравнения — твердость по Бринеллю (HB) в диапазоне 200–600. Результаты визуализировали в виде графиков и обработали с помощью нейросети. Точность ее вычислений составила 98 %.

Обсуждение и заключение. Для определения прочностных свойств однородных конструкций достаточно характеристики скорости перемещения внутри образца. Для неоднородной структуры необходимо вводить дополнительные параметры — перемещения на поверхности и внутри образца в фиксированных точках наблюдений. Комплексный подход к определению прочностных свойств неоднородной конструкции повышает точность расчетов, а использование нейросетей — их скорость.

Ключевые слова: многослойная конструкция, слоистый материал при ударе, уровень предела текучести, твердость по Бринеллю, прочность неоднородной конструкции

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Бабушкина Н.Е., Ляпин А.А. Определение динамических напряжений и перемещений при действии ударной нагрузки на двухслойную конструкцию в процессе индентирования. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):264–273. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Original Empirical Research

Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process

Natalia E. Babushkina ✉, **Alexandr A. Lyapin**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ copybird@yandex.ru

Abstract

Introduction. Numerous researchers of the reliability of building structures pay attention to hardness, an important characteristic of the structural material. It is determined by indentation — pressing the tip of the tool into the surface. The advantages of dynamic indentation methods and the distribution of stress intensity on the surface and inside the sample are investigated. However, the condition of layered materials on impact has been poorly studied. The objective of the presented work is to consider indentation for a two-layer sample and determine the sensitivity of the top layer to the strength of the substrate. This will allow us to identify significant characteristics of the strength properties of homogeneous and heterogeneous structures.

Materials and Methods. An elastoplastic model of material behavior and a shock indentation scheme were used, which took into account the masses of the indenter and the striker coupled by linear springs. The surface of the indenter was conical, the opening angle was 120°. The impact was simulated in the MATLAB system. Finite element model in Ansys APDL was used to verify the data and analyze the results of the experiment. Traditional models of elasticity theory were used for calculations. The behavior of the material in the zone of plastic deformation was described using the options of multilinear isotropic hardening and the von Mises plasticity criterion.

Results. The results of comparing three versions of varying the level of yield strength in the bottom layer are presented: when the yield strength in the bottom layer is half as high as the top one, equal to it, and twice as high. Displacements at different observation points for samples with a top layer of 2 mm and 1 mm were analyzed. In the first case, under horizontal shear, the displacement indices inside the sample did not change if the yield strength level was twice lower or higher than in the top one. If these indicators were equal, the difference became noticeable. In the second case (layer 1 mm), the difference in displacement was visible at all observation points. Thus, it can be reasonably concluded that a structure with a smaller top layer is more sensitive to impact. In the course of the research, it became known that vibrations associated with the transition to the plasticity zone occurred in the 2 mm zone, and elastic damping vibrations occurred below this zone. We solved the classification problem for the top layer of the material with changing characteristics of the base. The indicator for comparison was the Brinell hardness (HB) in the range of 200–600. The results were processed using a neural network and visualized in the form of graphs. The accuracy of its calculations was 98%.

Discussion and Conclusion. To determine the strength properties of homogeneous structures, it is sufficient to characterize the speed of displacement inside the sample. For an inhomogeneous structure, additional parameters should be introduced — displacements on the surface and inside the sample at fixed observation points. An integrated approach to determining the strength properties of an inhomogeneous structure improves the accuracy of calculations, and the use of neural networks increases their speed.

Keywords: multilayer structure, layered material on impact, yield strength level, Brinell hardness, strength of heterogeneous structure

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Babushkina NE, Lyapin AA. Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):264–273. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273

Введение. При проектировании и эксплуатации строительных конструкций предъявляются высокие требования к их прочности и надежности [1]. В литературе рассматриваются вопросы безотказности работы конструкции [2], а также сохранения ее эксплуатационных свойств на протяжении всего срока службы [3].

С инженерной точки зрения твердость — одна из важных характеристик материала. Она связана с такими механическими свойствами, как предел текучести, предел прочности, предел выносливости и пр. Твердость материала определяют вдавливанием наконечника инструмента в поверхность. Различают статическое и динамическое вдавливание. Испытание на статическое вдавливание включает вдавливание твердого индентора в плоскую и гладкую поверхность мягкого материала (мишени), механические свойства которого определяются по измеренной зависимости приложенной нагрузки от глубины внедрения. Статические методы не позволяют оценить физико-математические характеристики материала в условиях динамического нагружения [4]. Для этого используют методы динамического индентирования [4].

ГОСТ Р 56474–2015[1] представляет динамическое индентирование как внедрение индентора в материал под действием однократного ударного импульса, создаваемого специальным разгонным устройством или силой тяжести. Такой подход относится к методам неразрушающего контроля. Их основной принцип — безопасное обследование, определение целостности и основных рабочих свойств объекта [5]. Главное преимущество — простота применения.

Испытание на вдавливание — это сложный процесс, который включает механику контакта, нелинейность материала и механику разрушения. Для общих случаев очень трудно получить аналитические решения. Поэтому понимание рассматриваемых процессов основано главным образом на экспериментах и моделировании методом конечных элементов.

Упругий контакт впервые изучил Г. Герц [6] в конце XIX века. Он пытался найти точное определение твердости, используя эластичный процесс. Позже Ж.В. Буссинеск разработал основанный на теории потенциала метод расчета напряжений и перемещений в упругом теле, нагруженном любым жестким осесимметричным индентором. Что касается углублений, связанных с пластической деформацией, то ранние исследования были сосредоточены на пределе текучести и прочности при растяжении.

В публикациях уделяется внимание методам динамического индентирования с целью определения прочностных свойств конструкций. Так, Н.Н. Автономов и А.В. Тололо рассмотрели задачу вдавливания шарового индентора в упругопластический материал [7]. Авторы проанализировали распределение интенсивности напряжений на поверхности и внутри образца. Так стало известно, что зоны максимальной интенсивности располагаются на небольшом расстоянии от зоны контакта индентора и образца, а при увеличении нагрузки расширяются.

Зарубежные авторы [8] разработали метод динамического вдавливания, заключающийся в измерении глубины и реакции на нагрузку образца в процессе вдавливания. Для определения углубления использовался метод измерения смещений, основанный на муаровой интерферометрии. Нагрузку измеряли кварцевым датчиком. Результаты численного моделирования методом конечных элементов свидетельствуют о том, что такой подход достаточно хорошо согласуется со значениями, полученными при традиционных методах определения скорости деформации.

Ученые рассматривали прочностные свойства материалов в процессе индентирования. Этому посвящено немало работ, например [9]. Изучение поведения «мишени» под воздействием механических нагрузок играет ключевую роль в разработке новых материалов, конструкций и изделий [10]. Комплексные исследования позволяют решать задачи оптимизации технологических процессов, обеспечения надежности конструкций и предотвращения отказов в их работе.

Полученные решения открывают возможность создавать более эффективные и устойчивые структуры [11], что обусловливает актуальность изысканий в данном направлении. При этом все еще недостаточно изучен вопрос состояния слоистых конструкций при ударном воздействии.

Цели работы — анализ напряжений и перемещений в двухслойной конструкции и выявление уровня чувствительности верхнего слоя образца к прочности подложки. Исследование позволит установить значимые характеристики для определения прочностных свойств однородных и неоднородных конструкций.

Материалы и методы. Схема прибора ударного индентирования представлена на рис. 1.

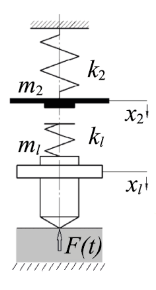


Рис. 1. Схема прибора ударного индентирования

[1] ГОСТ Р 56474–2015. *Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200122009 (дата обращения: 14.05.2024).

Система дифференциальных уравнений, соответствующая динамике механических элементов прибора ударного индентирования, имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 &= k_1\left(x_2 - x_1\right) - F\left(t\right), \\ m_2\ddot{x}_2 &= -k_2 x_2 - k_1\left(x_2 - x_1\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Так описывается колебательный процесс динамической системы с двумя массами: m_1 — масса индентора; m_2 — масса ударника. Массы сцеплены линейными пружинами с жесткостью k_1 и k_2 соответственно [12]. Величины вертикальных перемещений $x_1(t)$, $x_2(t)$ как степени свободы массивных элементов неизвестны во времени. Ударник взвели на высоту h. После спуска в момент контакта с индентором он достиг скорости

$$v_{20} = \sqrt{2gh + \frac{k_2 h^2}{m_2}}.$$

Таким образом, к системе (1) следует добавить начальные условия:

$$x_1\left(0\right) = 0, \dot{x}_1\left(0\right) = 0, x_2\left(0\right) = 0, \dot{x}_2\left(0\right) = v_{20}. \tag{2}$$

Неизвестна величина $F(t)$ силы сопротивления со стороны индентируемого материала.

Считаем, что поверхность индентора — коническая с углом раскрытия α = 120 град. Значит, необходимо использовать упруго-пластическую модель поведения испытуемого материала. В вершине конуса совпадает начало ударного воздействия и пластической деформации.

Ударный процесс моделировали в системе «Матлаб» (Matlab). Это позволило подобрать механические параметры установки. Для верификации данных и анализа результатов эксперимента использовали конечноэлементную модель в среде Ansys APDL. Рассматривалась двухслойная конструкция. Анализировались ее перемещения и напряжения, возникающие в двухслойном образце при действии динамической нагрузки. В расчетах применялись традиционные модели теории упругости. Для описания поведения материала в области пластического деформирования задействовали опции мультилинейного изотропного упрочнения и критерий пластичности Мизеса:

$$f\left(\sigma, \sigma_y\right) = \sigma_e - \sigma_y = 0. \tag{3}$$

где σ_e — эквивалентное напряжение фон Мизеса, $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}\left(\sigma\colon\sigma - \frac{1}{3}tr\left(\sigma\right)^2\right)}$, σ_y — предел текучести при одноосной нагрузке.

Для контроля точности сходимости предварительно подобрали сетку конечных элементов. При исследовании параметров двуслойной конструкции рассмотрели три варианта варьирования уровня предела текучести в нижнем слое в трех случаях — когда предел текучести в нижнем слое вдвое меньше верхнего, равен ему и вдвое больше (таблица. 1).

Таблица 1

Структура и параметры исследуемых конструкций

№ п/п	Уровень предела текучести в нижнем слое по отношению к верхнему (коэффициент — KE)	Слой, мм	
		верхний	нижний
1	1/2	1	9
2	1		
3	2		
4	1/2	2	8
5	1		
6	2		

Детальный анализ перемещений в различных точках наблюдения наглядно показывает отличие характера перемещений в области пластических деформаций. Для изучения перемещений выбрали следующую схему (рис. 2). Верхний слой конструкции для наглядности выделили более темным серым цветом.

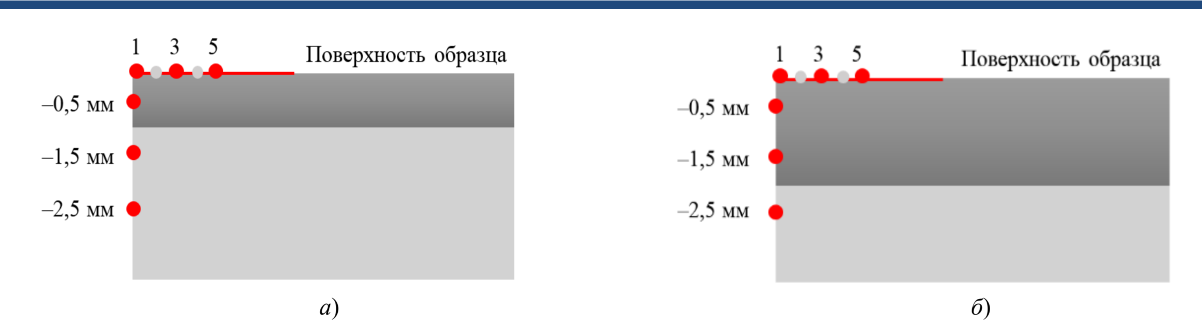


Рис. 2. Определение точек для измерений вертикальных и горизонтальных перемещений: *а* — конструкция с верхним слоем 1 мм; *б* — конструкция с верхним слоем 2 мм. Цифры 1, 3 и 5 обозначают уровень предела текучести в нижнем слое по отношению к верхнему в соответствии с таблицей 1

Результаты исследования. На рис. 3 представлена сравнительная характеристика уровня перемещений на поверхности образца с горизонтальным сдвигом точки наблюдения от точки ударного воздействия.

При верхнем слое 1 мм

При верхнем слое 2 мм

а) *б)*

в) *г)*

д) *е)*

КЕ = 0,5 КЕ = 1 КЕ = 2

Рис. 3. Перемещения на поверхности образца в различных точках контакта: *а*, *б* — в 1-й точке контакта; *в*, *г* — в 3-й точке на поверхности; *д*, *е*, — в 5-й точке на поверхности

Как видим, для двухслойной конструкции с верхним слоем 2 мм изменение уровня текучести в 1-й и 3-й точках контакта при горизонтальном сдвиге не влияет на показатели перемещений внутри образца. В 5-й точке разница становится заметной. Для конструкции с верхним слоем 1 мм разница уровня перемещений заметна во всех точках наблюдения. Можно сделать вывод, что конструкция с меньшим верхним слоем более чувствительна к ударному воздействию.

На рис. 4 показаны распределения интенсивности напряжения при различном уровне верхнего покрытия. Приведенные данные позволяют утверждать, что в зоне 2 мм происходят колебания, связанные с переходом в зону пластичности, ниже этой зоны — упругие колебания, затухающие со временем.

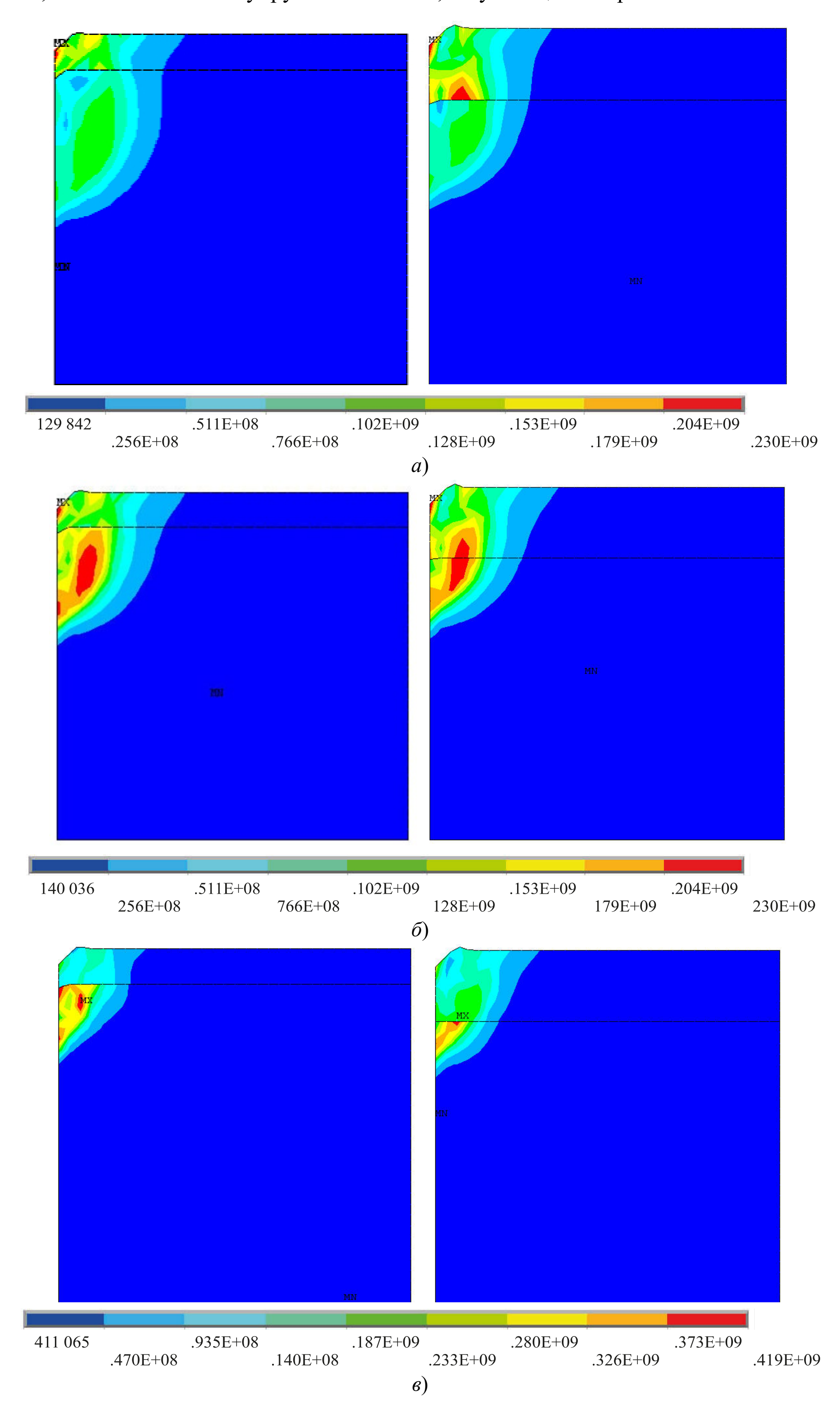


Рис. 4. Интенсивность напряжений при различных значениях КЕ, МПа: *а* — КЕ = 0,5; *б* — КЕ = 1; *в* — КЕ = 2

На рис. 5 построены графики напряжений на поверхности в различных точках наблюдений.

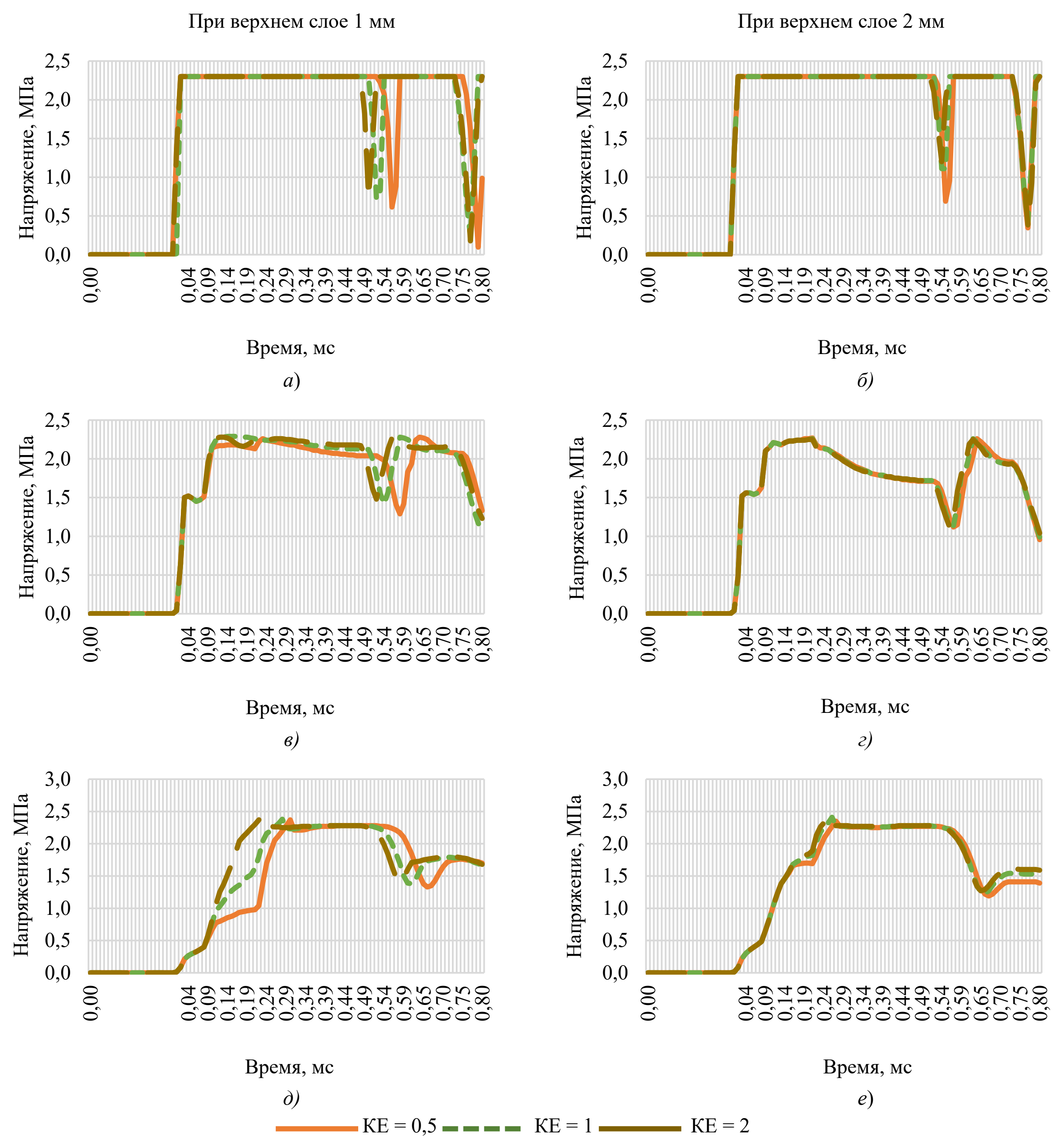


Рис. 5. Напряжения на поверхности образца в различных точках контакта:
а, *б* — в точке контакта; *в*, *г* — в 3-й точке на поверхности;
д, *е*, — в 5-й точке на поверхности

Для анализа влияния основания на прочностные свойства образца решили задачу классификации [12] по значению Бринеллевой твердости (HB) верхнего слоя материала с изменяющимися характеристиками основания. В рамках исследования выделили пять классификационных групп (таблица 2).

Таблица 2

Классификационные группы

№ п/п	Группа	Значение HB
1	I	200
2	II	300
3	III	400
4	IV	500
5	V	600

Расчетные значения, полученные с помощью математической модели, подавались на вход нейронной сети. На рис. 6 представлены значения скоростей и перемещений для выделенных групп твердости.

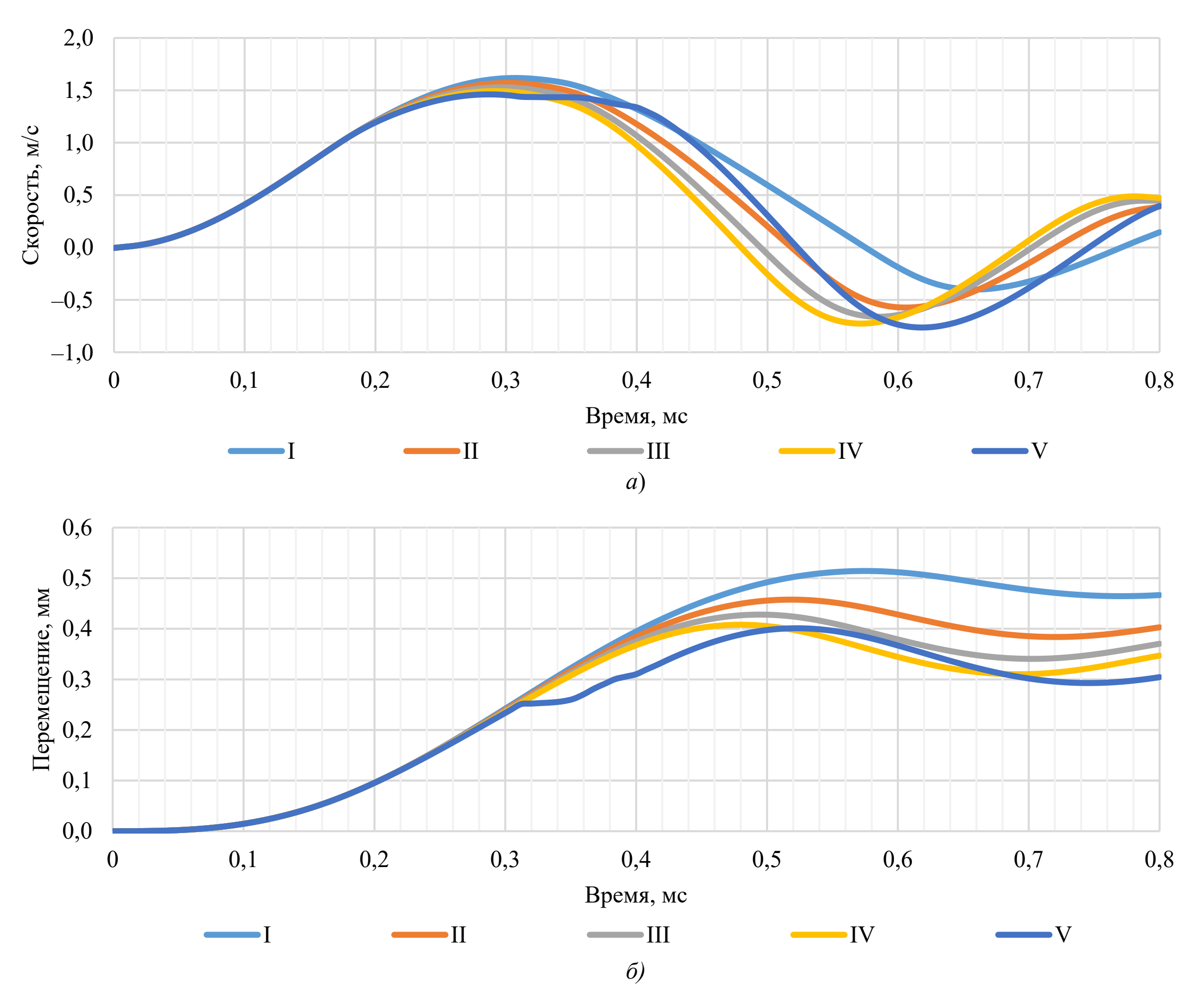


Рис. 6. Расчетные значения по классификационным группам:
а — скорость внедрения индентора; *б* — перемещения

Для дальнейшей обработки данных использовали созданную и обученную нейронную сеть с полносвязной структурой [13]. Стоит отметить, что нейронные сети обладают широкими возможностями в решении такого типа задач [14], в частности в области строительства [15]. Нейронные сети часто используются для качественной оценки, прогнозирования и мониторинга состояния строительных конструкций [16], а также для параметрической идентификации объектов [17]. Увеличение вычислительных мощностей нейронных сетей напрямую влияет на развитие их функционала [18].

Точность вычислений нейросети составила 98 %. Следовательно, нейросеть верно анализирует экспериментальные данные и способна адекватно учесть поведение материала при ударном нагружении.

Обсуждение и заключение. Таким образом, анализ распределения перемещений и напряжений в образце позволяет сделать ряд заключений.

1. Уровень вертикальных перемещений в волновом процессе значительно выше, чем в горизонтальном.
2. Уровень жесткости подложки влияет на распределение перемещений и напряжений.
3. В более прочном нижнем слое перемещения заметно меньше, чем в мягком.
4. Верхний слой чувствителен к прочности подложки, если его высота не превышает 1 мм.
5. С удалением от места индентирования деформации становятся упругими, напряжение не выходит в область пластических деформаций.

По итогам работы можно утверждать, что для определения прочностных свойств однородных конструкций достаточно одной величины, характеризующей скорость перемещения внутри образца. Для неоднородной структуры необходимо вводить такие дополнительные параметры, как перемещения на поверхности и внутри образца в фиксированных точках наблюдений. Комплексный подход к определению прочностных свойств неоднородной конструкции позволит повысить точность расчетов. А использование нейросетевых технологий для решения такого типа задач открывает возможность более быстрых вычислений.

Список литературы / References

1. Lyapin A, Beskopylny A, Meskhi B. Structural Monitoring of Underground Structures in Multi-Layer Media by Dynamic Methods. *Sensors*. 2020;20(18):5241. https://doi.org/10.3390/s20185241

2. Чесноков А.В., Михайлов В.В., Долматов И.В. Выявление повреждений мягкой оболочки тентовой строительной конструкции покрытия при помощи искусственной нейронной сети. *Строительная механика и конструкции*. 2022;33(2):98–109.

Chesnokov AV, Mikhailov VV, Dolmatov IV. Damage Detection in the Soft Shell of the Fabric Roof Construction of Buildings by means of Artificial Neural Network. *Structural Mechanics and Structures.* 2022;33(2):98–109.

3. Куклина М.В., Лебер А.И., Махакова А.М. Использование технологии нейронных сетей в строительной организации. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022;(5–3):362–368. https://doi.org/10.17513/vaael.2219

Kuklina MV, Leber AI, Makhakova AM. The Use of Neural Network Technology in a Construction Organization. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law.* 2022;(5–3):362–368. https://doi.org/10.17513/vaael.2219

4. Кузьмичев М.В., Егоров Р.А. Моделирование и алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018;18(5):794–800. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-794-800

Kuzmichev MV, Egorov RA. Modeling and Algorithmic Provision of Dynamic Indentation Process. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2018;18(5):794–800. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-794-800

5. Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н. Прогнозирование технического состояния деталей индентированием в различных условиях нагружения. *Вестник Тверского государственного технического университета. Технические науки*. 2022;13(1):22–27.

Matlin MM, Kazankin VA, Kazankina EN. Prediction of the Technical Condition of Parts by Indenting in Different Loading Conditions. *Herald of Tver State University. Series: Technical Sciences.* 2022;13(1):22–27.

6. Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования. *Литье и металлургия.* 2017;(2):81–87. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87

Rudnitsky VA, Kren AP, Lantsman GA. Evaluation of Metallic Materials Plasticity by Dynamic Indentation Method. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2017;(2):81-87. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87

7. Oliver WC, Pharr GM. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7:1564–1583. http://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564

8. Автономов Н.Н., Тололо А.В. Исследование распределения напряжения в образце при вдавливании шарового индентора. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018;14(1):245–247.

Avtonomov NN, Tololo AV. Exploration of the Stress Distribution in the Specimen during Indentation of the Indenter Ball. *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics.* 2018;14(1):245–247.

9. Jun Lu, Subra Suresh, Guruswami Ravichandran. Dynamic Indentation for Determining the Strain Rate Sensitivity of Metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 2003;51(11–12):1923–1938. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2003.09.007

10. Matyunin VM, Nuha Abusaif, Marchen*kov* AYu. Analysis of the Indentation Size Effect on the Hardness Measurements of Materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399(4):044016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044016

11. Varghese J, Radig GF, Herkommer D, Dasgupta A. Hybrid Experimental and Computational Approach for Rate Dependent Mechanical Properties Using Indentation Techniques. In: *EuroSimE 2005. Proc. 6th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*. New York City: IEEE; 2005. P. 510–514. https://doi.org/510-514. 10.1109/ESIME.2005.1502858

12. Kubenko V. Nonstationary Displacements in an Axisymmetric Problem for an Elastic Half-Space Under Mixed Boundary Conditions. *International Applied Mechanics*. 2021;57:148–159. https://doi.org/10.1007/s10778-021-01069-3

13. Бескопыльный А.Н., Веремеенко А.А., Копылов Ф.С., Крымский В.С. Задача о статическом внедрении конического индентора в область с поверхностным упрочнением. *Инженерный вестник Дона.* 2018;49(2):214–218.

Beskopylny AN, Veremeenko AA, Kopylov FS, Krymskiy VS. The Problem for Static Conical Indentation into the Surface Hardened Area. *Engineering Journal of Don.* 2018;49(2):214–218.

14. Zesheng Lin, Hongxia Ye, Bin Zhan, Xiaofeng Huang. An Efficient Network for Surface Defect Detection. *Applied Sciences*. 2020;10(17):6085. https://doi.org/10.3390/app10176085

15. Babushkina N, Lyapin A, Kovaleva A. Analysis of Neural Network Results Based on Experimental Data during Indentation. In: *Topical Problems of Agriculture, Civil and Environmental Engineering. E3S Web of Conferences* (*TPACEE*). 2020;224:01018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022401018

16. Elfaki AO, Alatawi S, Abushandi E. Using Intelligent Techniques in Construction Project Cost Estimation: 10-Year Survey. *Advances in Civil Engineering*. 2014;2014:107926. https://doi.org/10.1155/2014/107926

17. Patel DA, Jha KN. Evaluation of Construction Projects Based on the Safe Work Behavior of Co-employees through a Neural Network Model. *Safety Science*. 2016;89:240–248. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.06.020

18. Порошин И.Е., Титов М.А. Использование искусственных нейронных сетей для параметрической идентификации объектов. *Молодой ученый.* 2020;316(26):39–42.

Poroshin IE, Titov MA. Using Artificial Neural Networks for Parametric Identification of Objects. *Young Scientist.* 2020;316(26):39–42. (In Russ.)

19. Алферьев Д.А. Использование искусственных нейронных сетей в современном обществе. *Социальная сфера*. 2020;6(3):6. https://doi.org/10.15838/sa.2020.3.25.6

Alfer'ev DA. Usage of Artificial Neural Networks in Modern Society. *Social Area*. 2020;6(3):6. https://doi.org/10.15838/sa.2020.3.25.6

Об авторах:

Наталья Евгеньевна Бабушкина, ассистент кафедры вычислительной техники и программирования Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, copybird@yandex.ru

Александр Александрович Ляпин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем в строительстве Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.Е. Бабушкина: описание теоретической части исследования, проведение расчетов, создание нейронной сети, формирование выводов, оформление научной статьи.

А.А. Ляпин: постановка цели и задач исследования, анализ результатов исследования, доработка текста, корректировка выводов.

***Конфликт интересов*: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Natalia E. Babushkina, Teaching assistant of the Computer Engineering and Programming Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, copybird@yandex.ru

Alexandr A. Lyapin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Information Systems in Construction Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, lyapin.rnd@yandex.ru

Claimed Contributorship:

NE Babushkina: description of the theoretical part of the study, calculations, creation of a neural network, formulation of conclusions, design of the scientific article.

AA Lyapin: setting research objective and tasks, analysis of the study results, revision of the text, correction of the conclusions.

***Conflict of Interest Statement:* the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.05.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 25.06.2024
Принята к публикации / Accepted 27.06.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.75:005.8
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282

Оригинальное эмпирическое исследование


EDN: XYZSQL

Типизация проектов перехода на облачные сервисы

А.Г. Воронова
Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск
✉ annaec@ya.ru

Аннотация

Введение. Цифровые решения позволяют сделать работу компании четче, сократить расходы на персонал, обеспечить безопасность данных. В литературе описаны различные аспекты автоматизации, цифровизации и облачных технологий. Ставится вопрос о качестве методологической основы таких преобразований. Представлены глобальный и узкий технический подходы. Как правило, материалы подаются с позиций специалистов по внедрению цифровых технологий. В данной работе впервые предлагается авторская схема, которая позволит ориентироваться в предстоящем переходе в облако не только провайдерам, но и их заказчикам. Последние получат систематизированные сведения о том, как выбрать подрядчика и вариант сотрудничества, наиболее целесообразный с экономической точки зрения.

Материалы и методы. Информационная модель строилась на базе семантической сети как система узлов, их характеристик и связей. Визуализированы управление проектом миграции в облачные сервисы и сама миграция. Обобщена практика заключения договоров между провайдерами и их заказчиками. Учтены особенности техзаданий таких проектов. Часть предметной области, касающаяся реализации облачного сервиса, алгоритмирована — представлен пошаговый переход в облако, обобщенная схема процесса с учетом иерархии элементов.

Результаты исследования. Впервые предложен метод самостоятельной подготовки компании к внедрению облачных решений. Алгоритм систематизирует процессы миграции в облако. Описаны мероприятия, связанные с целеполаганием, ИТ-аудитом, выбором облачной среды и сервисов, расчетом экономической эффективности проекта, планированием и реализацией миграции, техподдержкой и масштабированием процессов. Показаны возможности определения экономической целесообразности мероприятий по переходу в облако. Учитываются затраты на оборудование, хранение и обработку данных, лицензии на софт, зарплаты, обеспечение информационной безопасности и пр. Полученную сумму сравнивают с предложениями провайдеров. Для окончательного решения принимаются во внимание расходы на поддержку инфраструктуры — заказчиком или аутсорсером. Выбирается оптимальный вариант. В итоге заказчик получает возможность работать с лучшей рентабельностью и масштабировать проект. Предусмотрена отработка обратной связи и корректировка процессов, начиная с повторного ИТ-аудита.

Обсуждение и заключение. Предложенное решение даст менеджменту заказчика системное представление о том, в какой последовательности действовать при миграции в облако, какие вопросы и задачи обсуждать с потенциальным аутсорсером. Провайдеры могут применить алгоритм для типизации, унификации проектов, что в итоге упростит согласование с клиентами перечня услуг и порядка миграции. Таким образом стороны высвободят значительные ресурсы по времени, трудовым и иным затратам. К тому же заказчики и провайдеры могут отчасти задействовать описанную семантическую сеть, чтобы отработать не только организационную, но и техническую сторону проекта.

Ключевые слова: методология цифровых преобразований, пошаговый переход в облако, миграция в облако, рентабельность миграции в облако

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Воронова А.Г. Типизация проектов перехода на облачные сервисы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(3):274–282. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282

Original Empirical Research

Typification of Projects for the Transition to Cloud Services

Anna G. Voronova
Luhansk Vladimir Dahl State University, Luhansk, Luhansk People's Republic
✉ annaec@ya.ru

Abstract
Introduction. Digital solutions make the operation of the company clearer, reduce staff costs, and provide data security. Various aspects of automation, digitalization and cloud technologies are described in the literature. The question is raised about the quality of the methodological basis for such transformations. Global and narrow technical approaches are presented. As a rule, materials are presented from the perspective of experts in the implementation of digital technologies. In this paper, for the first time, the author's scheme is proposed that can allow not only providers, but also their customers to navigate the upcoming transition to the cloud. The latter will receive systematic information on how to select a contractor and the most economically feasible option of cooperation.
Materials and Methods. The information model was based on the semantic network as a system of nodes, their characteristics and connections. Management of the cloud migration project and the migration itself were visualized. The contraction practice between providers and their customers was summarized. The specifics of the tasks of such projects were taken into account. The part of the subject area related to the implementation of a cloud service is algorithmic — a step-by-step transition to the cloud, a generalized scheme of the process taking into account the hierarchy of elements are presented.
Results. For the first time, a method of self-preparation of a company for the implementation of cloud solutions is proposed. The algorithm systematizes the cloud migration processes. The activities related to goal setting, audit, selection of cloud environment and services, calculation of the economic efficiency of the project, planning and implementation of migration, technical support and scaling of processes are described. The possibilities of determining the economic feasibility of measures for the transition to the cloud are shown. The costs of equipment, data storage and processing, software licenses, salaries, information security, etc., are taken into account. The amount received is compared to the providers' offers. For the final decision, the costs of infrastructure support are taken into account — by the customer or the outsourcer. The best option is selected. As a result, the customer gets the opportunity to work with better profitability and scale the project. Feedback is provided, and processes are adjusted, starting with IT reaudit.
Discussion and Conclusion. The proposed solution will give the customer's management a system view of the execution sequence when migrating to the cloud, the issues and tasks to discuss with a potential outsourcer. Providers can use the algorithm to typify and unify projects, which can eventually simplify the coordination of the list of services and the migration procedure with customers. In this way, the parties can free up significant resources in terms of time, labor and other costs. In addition, customers and providers can partially use the described semantic network to develop not only the organizational, but also the technical aspect of the project.

Keywords: digital transformation methodology, step-by-step transition to the cloud, cloud migration, profitability of cloud migration

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Voronova AG. Typification of Projects for the Transition to Cloud Services. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):274–282. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282

Введение. Сложившаяся социально-экономическая конъюнктура создает условия для автоматизации и цифровизации работы предприятий и организаций. Это продиктовано, в частности, дефицитом кадров, новыми требованиями к оперативности и устойчивости производственных и управленческих процессов. Исследуются различные аспекты автоматизации, цифровизации и облачных технологий. В работе [1] рассмотрен глобальный подход к цифровизации предпринимательской деятельности. В [2] показана необходимость перехода к новым цифровым бизнес-моделям. Поэтапная цифровая трансформация предприятия предполагает последовательное освоение разных уровней, которые описаны в [3]. В [4] исследована перенастройка процессов управления, необходимая для цифровизации.

Основные этапы цифровизации:

– предварительное исследование — определение целей и моделирование бизнес-процессов;

– выбор и внедрение аппаратных, программных и аппаратно-программных решений.

Организации могут провести эти мероприятия собственными силами, но на практике часто обращаются к ИТ-компаниям.

Один из приоритетов цифровой трансформации — развитие облачных технологий и сервисов [5]. Президент РФ Владимир Путин поручил обеспечить деятельность облачной инфраструктуры в стране и развивать отечественные облачные технологии[1].

Для адекватного внедрения облачных сервисов необходима качественная методологическая основа. В [6] предложена методика поддержки принятия решений при выборе облачных ИТ-сервисов. Однако недостаточно проработан вопрос алгоритмизации перехода на облако, особенно для заказчиков облачных сервисов, которые не работают в ИТ-сфере. При этом некоторые мероприятия миграции они могут планировать и внедрять самостоятельно. Представленная работа восполняет этот пробел. Ее цель — сформировать типовую структуру проекта перехода на облачные сервисы в условиях цифровой трансформации. Предложенное решение будет базой для создания и реализации таких проектов. К тому же оно позволит собирать, обрабатывать и использовать аналитику по реализуемым процессам.

Материалы и методы. Для построения информационной модели и отображения знаний в предметной области выбрана семантическая сеть. Она содержит объекты — узлы и связи — отношения между ними. Такая наглядная структура упрощает понимание и интерпретацию знаний. На рис. 1 представлена семантическая сеть управления проектом перехода на облачные сервисы.

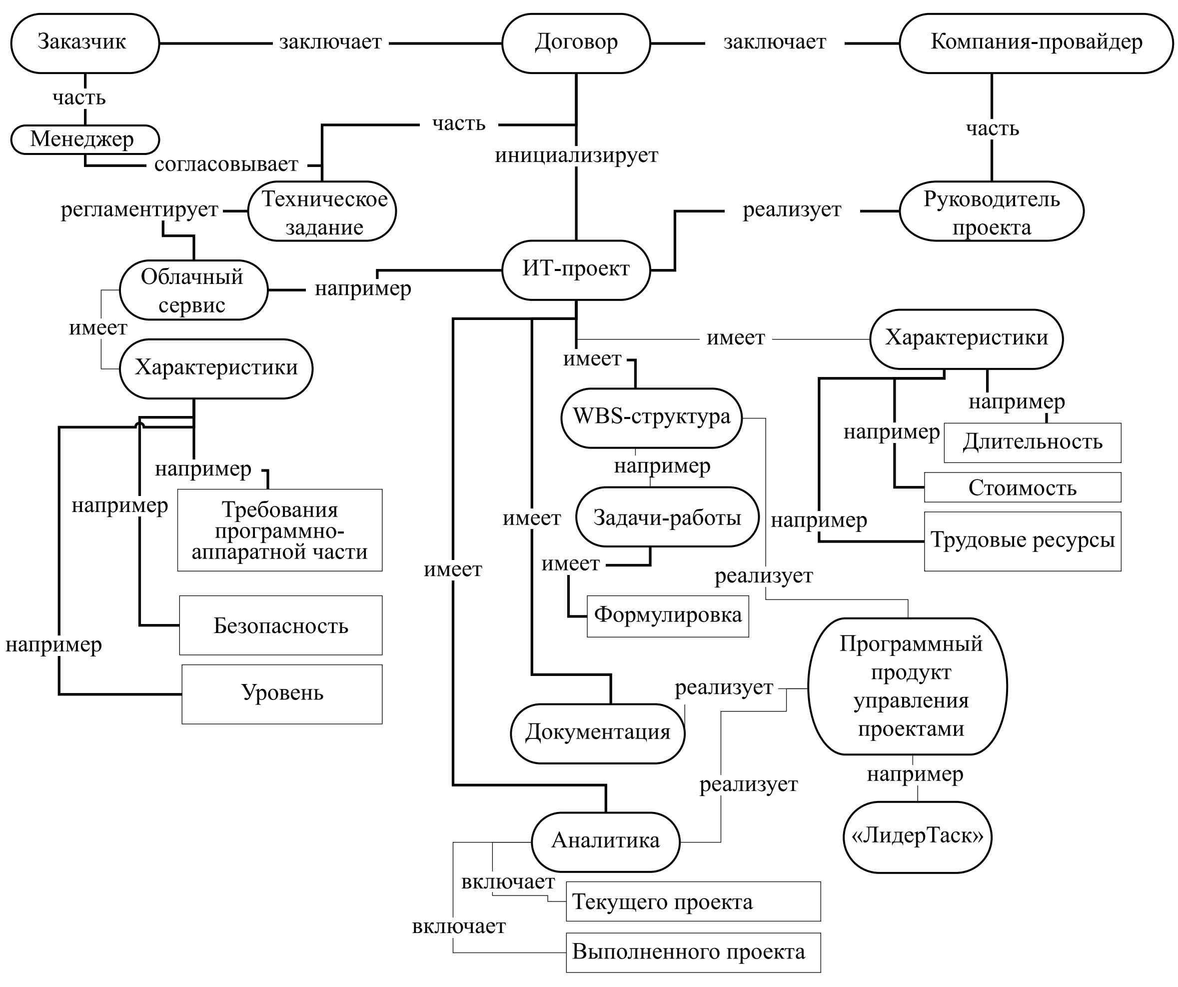


Рис. 1. Семантическая сеть управления проектом перехода на облачные сервисы:

— узлы; — характеристики; — связи между узлами

Примечание: WBS — иерархическая структура работ или структурная декомпозиция работ (от англ. work breakdown structure).

[1] *Путин поручил поддержать развитие отечественных облачных технологий*. ТАСС. URL: https://tass.ru/ekonomika/16418975 (дата обращения: 16.01.2024).

Провайдер облачных решений заключает договор с заказчиком. Составляется техническое задание и запускается ИТ-проект, которым руководит специалист компании-провайдера. Техническое задание регламентирует содержание, состав и требования к услуге (облачному сервису). Облачный сервис предъявляет требования:

– к программно-аппаратной части (размещение инфраструктуры, виртуальные ресурсы, облачные сервисы);

– к обеспечению безопасности;

– к технической поддержке.

Представитель заказчика и руководитель проекта от провайдера определяют часть, которая передается на аутсорсинг и будет реализована в рамках ИТ-проекта.

Часть предметной области, касающаяся реализации облачного сервиса, требует большей формализации. В данном случае алгоритмизация позволила описать пошаговый переход в облако и показать обобщенную схему этого процесса. В алгоритме:

– выделили основные процессы и подпроцессы внедрения облачных сервисов;

– определили последовательность перехода между ними;

– указали связи, позволяющие вернуться к предыдущим этапам для принятия иных решений.

Для описания технических параметров перехода в облако проанализировали лучшие практики, известные из открытых источников, в том числе из научной литературы. Часть управления ИТ-проектом формализована с помощью семантической сети.

Приняли во внимание основные действия при разработке проекта:

– выявление и анализ потребностей;

– уточнение пожеланий заказчика;

– составление технического задания.

На основе проектного метода выделили базовые задачи (работы), которые необходимы для перехода в облако, и выстроили их иерархию. WBS-структура проекта включает список задач-работ. Указывается их длительность, связи, назначаются ресурсы для выполнения. При загруженности ресурсов возможен пересчет длительности работ. Затем определяются критические задачи, суммарная длительность которых соответствует сроку реализации всего проекта.

Итак, основные характеристики ИТ-проекта: длительность, стоимость, трудовые ресурсы. Для управления ИТ-проектом есть специальные программные продукты. В качестве примера приведем «Джиру» (Jira, создана австралийской компанией «Атласиан») [7] или отечественный аналог «ЛидерТаск» (LeaderTask, разработчик: ООО «Органайзер ЛидерТаск») [8].

Отметим, что в программном продукте управления проектами вместе с задачами-работами строится WBS-структура. Провайдеру необходимо унифицировать задачи-работы. В единой системе он кроме прочего ведет свою собственную документацию по проекту. Здесь же формируется аналитика для отслеживания реализации проекта и его функционирования после запуска.

На подсети «ИТ-проект имеет» выявлена потребность унифицировать формулирование и выполнение задач-работ. Возможный вариант предложен в данной статье. Облачные сервисы рассмотрены с точки зрения развития бизнеса, повышения его конкурентоспособности [9].

Результаты исследования. Итак, профессиональные провайдеры предлагают готовые облачные сервисы, настраивают их и сопровождают эксплуатацию. Однако предприятие может самостоятельно создать, внедрить решение и курировать его работу.

Методология управления проектами[2] [10] предполагает следующие этапы: инициализация, разработка, выполнение и завершение [11]. Отметим, что одни и те же задачи могут формулироваться по-разному, особенно если проекты ведут разные руководители. Типизация решений сократит трудозатраты на создание проектной документации, повысит ее качество, улучшит анализ.

Ниже перечислены основные шаги перехода на облако.

1. Определение целей.

2. Выбор провайдера.

3. ИТ-аудит. На этом этапе оценивается исходная ИТ-инфраструктура (эффективность, безопасность и пр.).

4. Выбор типа облачной среды и облачных сервисов.

5. Расчет экономической эффективности перехода на облачные сервисы.

6. Планирование миграции (составляется дорожная карта, определяются приоритеты, этапы, сроки, ресурсы, бюджет).

[2] *A Guide to the Project Management Body of Knowledge. PMBOK Guide*. Newtown Square: Project Management Institute; 2017. 579 p. URL: https://prothoughts.co.in/wp-content/uploads/2022/06/a-guide-to-the-project-management-body-of-knowledge-6e.pdf (дата обращения: 12.04.2024).

7. Миграция (составляется схема зависимости приложений, проектируется облачная инфраструктура, проводится тестовый запуск, данные переносятся в облако, сервис запускается в эксплуатацию).

8. Мониторинг работы и техподдержка.

9. Масштабирование.

Переход на облачные сервисы можно представить в виде алгоритма (рис. 2).

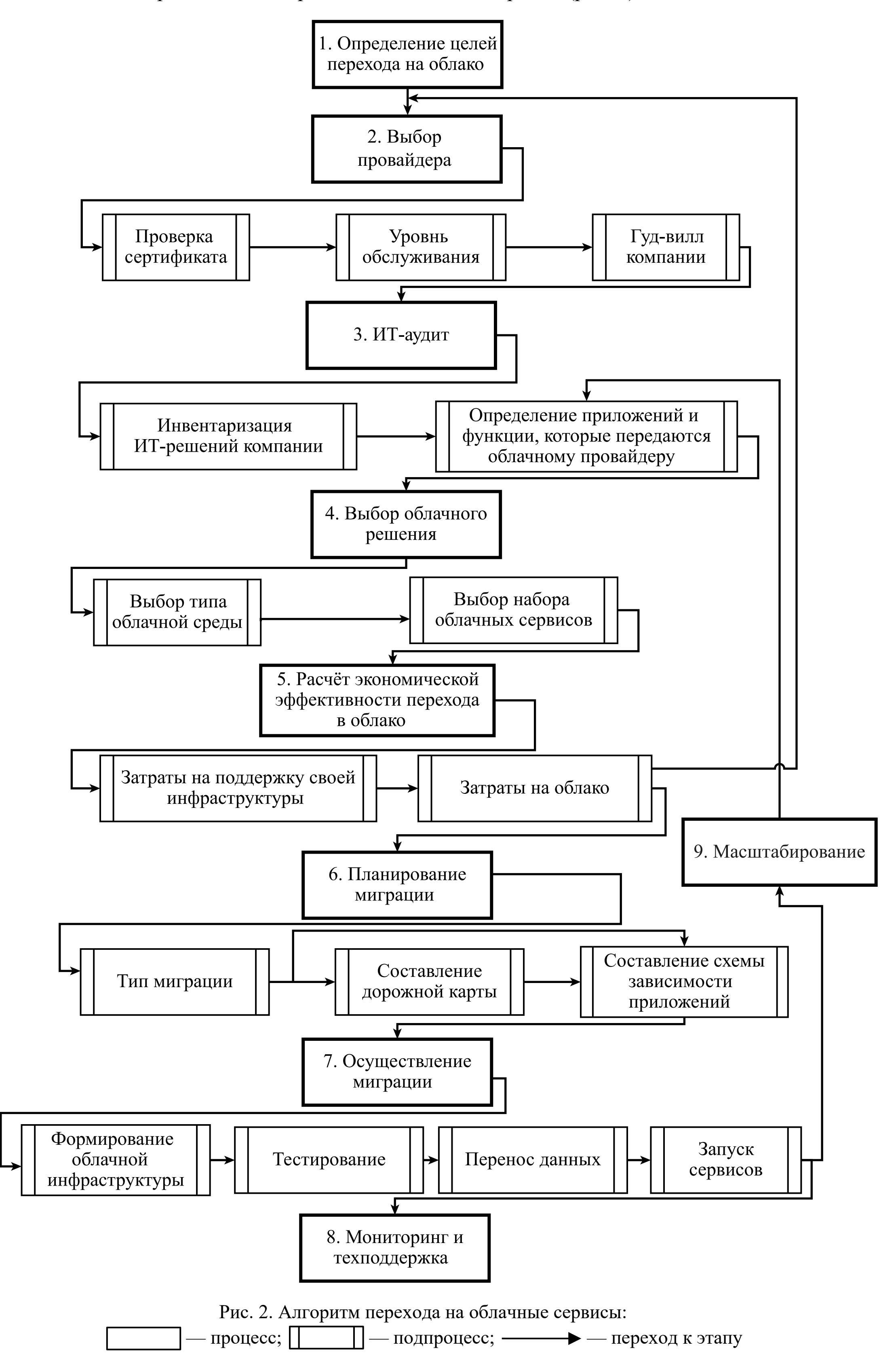


Рис. 2. Алгоритм перехода на облачные сервисы:
— процесс; — подпроцесс; — переход к этапу

Прокомментируем представленную схему.

1. Цель перехода в облако должна согласовываться с бизнес-стратегией компании. Как отмечалось выше, использование облачных сервисов делает бизнес более гибким и эффективным.

Задачи в проекте:

– переговоры с заинтересованными лицами и заказчиками;

– формулирование планируемого бизнес-результата.

2. Следует заранее сориентироваться, может ли быть партнером в проекте зарубежная компания. В ряде случаев возможно сотрудничество только с отечественными провайдерами. Ограничения связаны со сферой деятельности предприятия, государственной тайной, обработкой персональных данных и т. д. В таких случаях провайдер обязан иметь пакет документов:

– лицензия Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) на техническую защиту конфиденциальной информации;

– аттестат ФСТЭК;

– лицензия Федеральной службы безопасности (ФСБ) на криптографию;

– лицензия ФСБ на работу с гостайной;

– лицензия ФСТЭК по защите гостайны;

– аттестат соответствия при работе с персональными данными.

Стандартные предложения облачных провайдеров: внедрение и сопровождение виртуальных машин, центров обработки данных и пр. Однако услуги разных компаний отличаются тонкостями настроек, моделями оплаты, качеством сервиса и пользовательской поддержки.

Если для заказчика важен гудвилл партнера, он обратится к организации, которая хорошо известна на рынке.

На этом этапе следует, во-первых, проверить сертификат и лицензию провайдера. Во-вторых, необходимо согласовать общие характеристики услуги:

– гипервизор;

– категория надежности дата-центров согласно стандарту «Аптайм институт» (Uptime Institute);

– условия техподдержки;

– соглашение об уровне сервиса;

– тестовый доступ;

– модель оплаты.

Перечисленное выше — задачи в проекте.

Гипервизор — это программное обеспечение, которое применяется облачным провайдером для виртуализации и позволяет создавать многопользовательские логически независимые облачные среды.

Надежность инфраструктуры дата-центров может соответствовать стандарту Uptime Institute [12] и в ряде случаев должна быть не ниже «Тайер три» (Tier III) [13].

В соглашении об уровне сервиса прописываются зоны ответственности заказчика и клиента, фиксируются гарантии по услугам. Утверждаются сроки и параметры тестового доступа.

Практикуются разные модели оплаты облачных услуг. Самая распространенная — почасовая.

3. Анализируется ИТ-инфраструктура заказчика, прикладные приложения и их связи с ИТ-окружением. ИТ-аудит позволяет определить, какие функции можно передать облачному провайдеру, а какие оставить в собственной инфраструктуре. Нередко заказчик принимает решение о полном переходе в облако.

Задачи в проекте:

– заключение договора на ИТ-аудит;

– сбор информации о программном обеспечении предприятия;

– сбор информации о техническом обеспечении предприятия;

– сбор информации о топологии предприятия;

– построение модели бизнес-процессов «как есть»;

– построение модели бизнес-процессов «как будет»;

– составление перечня функций, которые передаются облачному провайдеру;

– сдача отчета ИТ-аудита.

4. Выбирается облачное решение. Сначала необходимо определиться с типом облачной среды [14]:

– IaaS (англ. infrastructure as a service — инфраструктура как услуга);

– PaaS (англ. platform as a service — платформа как услуга);

– SaaS (англ. software as a service — программное обеспечение как услуга).

Типы облачной среды отличаются элементами, которые передаются на обслуживание провайдеру: данные, сеть, серверы, операционные системы, программное обеспечение и т. д. [15]. Элементы среды могут остаться под управлением служб заказчика.

Задачи в проекте:

– выбрать тип облачной среды;

– определить набор облачных сервисов.

5. При переходе на облачные сервисы предприятию нужно оценить затраты на эксплуатацию стандартного центра обработки данных. Речь идет о расходах на систему хранения и обработки данных, коммуникационное оборудование, лицензии на программное и аппаратное обеспечение, серверы, зарплаты специалистов ИТ-службы предприятия, обеспечение информационной безопасности и пр. Полученную сумму сравнивают с предложениями облачных провайдеров. Они же могут выполнить все эти расчеты.

Определяются затраты:

– на поддержку инфраструктуры клиентом;

– на выбранный тип облачной среды.

Это задачи данного этапа проекта.

6. Выбор способа миграции зависит от масштабов, структуры и ИТ-инфраструктуры организации. Полную миграцию часто рекомендуют малому и среднему бизнесу, частичную практикуют крупные компании. Сроки проектов — от нескольких недель до года. При переходе на облачную модель решаются вопросы поддержки доступа к источникам данных, использования инструментов архивирования и восстановления.

Назовем задачи этой части проекта. Следует составить карту зависимости приложений и определить:

– тип миграции;

– список критических сервисов;

– время переноса.

7. На этапе миграции многое определяется индивидуальными особенностями заказчика, поэтому детальные решения формируются для конкретных условий. От этого, например, зависят особенности миграции физической инфраструктуры в виртуальную среду, переноса существующей виртуальной инфраструктуры.

Задачи в проекте:

– перенос (установка с нуля; «горячее» или «холодное» копирование данных);

– тестовый запуск;

– переработка приложений (при необходимости).

8. При эксплуатации любых ресурсов возможны проблемы. Облачные сервисы не исключение. Один из центральных вопросов их использования — безопасность. Как правило, она определяется качеством взаимодействия провайдера и сотрудников заказчика. Базовая задача — постоянное улучшение и исправление недостатков.

9. На схеме отдельно вынесен процесс масштабирования — развития решения, его распространения (например, на другие подразделения заказчика). Рекомендуется системно отрабатывать обратную связь. Таким образом можно получить информацию, которая укажет дальнейшее направление реализации проекта. В некоторых случаях целесообразно будет вернуться к предыдущим шагам алгоритма — вплоть до третьего, то есть ИТ-аудита.

Обсуждение и заключение. Переход на облачные ресурсы позволяет организациям более гибко и экономически обоснованно отстраивать цифровые процессы. Внедрение облаков может существенно сократить затраты на оборудование, софт, лицензии, зарплаты и пр. Российский рынок облачных сервисов развивается. Услуги предоставляют многие провайдеры. Публикуется литература, посвященная исследованию этих процессов. В рамках данной работы визуализируется и разъясняется схема, которая может быть базой для старта цифрового преобразования предприятия. Она дает менеджменту системное представление о том, в какой последовательности действовать, на что обратить внимание, какие вопросы обсуждать с провайдером, а какие прорабатывать с собственными специалистами.

Провайдеры могут задействовать предложенный алгоритм для типизации проектов, более оперативного согласования с клиентами перечня услуг и этапов перехода на облачные технологии.

Унификация комплексов задач для каждого шага описанного алгоритма должна обеспечить повышение качества проектной документации за счет проработанности организационных решений по проекту. Отметим, что и заказчики, и провайдеры могут отчасти учитывать представленный материал, чтобы проектировать и согласовывать техническую сторону миграции. Так, следует учитывать организационные, управленческие процессы при формировании подходов к координации и контролю данных в облачных решениях. Кроме того, следует разрабатывать технологии управления информацией в облачных решениях, которые обеспечат возможность миграции между провайдерами.

Список литературы / References

1. Фихтнер О.А. Цифровизация бизнес-процессов в глобальном мире. *Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий*. 2022;11(4):117–122. https://doi.org/10.24412/2225-8264-2022-4-117-122

Fikhtner OA. Digitalization of Business Processes in the Global World. *Herald of Siberian Institute of Business and Information Technologies*. 2022;11(4):117–122. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2225-8264-2022-4-117-122

2. Велигура А.В. Основные направления цифровизации экономики. *Социальная работа: современные проблемы и технологии*. 2020;1(1):54–62.

Veligura AV. Basic Directions of Digitalization of Economy. *Social Work: Modern Problems and Technologies*. 2020;1(1):54–62. (In Russ.)

3. Нигай Е.А. Процесс цифровизации бизнеса: от точечной оцифровки бизнес-процессов к цифровой трансформации. *ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика*. 2022;(2):134–145. https://doi.org/10.24412/2071-6435-2022-2-134-145

Nigai EA. Business Digitalization Process: from Point-to-Point Business Process Digitization to Digital Transformation. *ETAP: Economic Theory, Analysis, Practice*. 2022;(2):134–145. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2071-6435-2022-2-134-145

4. Рязанцева Н.А., Лофиченко А.А. Анализ состояния цифровой трансформации экономики Российской Федерации. *Менеджер*. 2022;102(4):55–61. https://doi.org/10.5281/zenodo.7442029

Ryazantseva NA, Lofichenko AA. Analysis of the State of the Digital Transformation of the Economy of the Russian Federation. *Manager*. 2022;102(4):55–61. https://doi.org/10.5281/zenodo.7442029

5. Бурый А.С. Облачные вычисления в цифровой трансформации информационных технологий. *Правовая информатика.* 2021;(2):4–14. https://doi.org/10.21681/1994-1404-2021-2-04-14

Buryi A. Cloud Computing in the Digital Transformation of Information Technologies. *Legal Informatics.* 2021;(2):4–14. https://doi.org/10.21681/1994-1404-2021-2-04-14

6. Разумников С.В. Методика поддержки принятия решений при выборе облачных ИТ-сервисов для внедрения на предприятии. *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2018;212(4):339–362. URL: https://veorus.ru/upload/iblock/a6a/veo_212.pdf (дата обращения: 14.04.2024).

Razumnikov SV. Methods Decision Support by Selecting Cloud IT Services for Implementation for Enterprise. *Transactions of the Free Economic Society of Russia*. 2018;212(4):339–362. URL: https://veorus.ru/upload/iblock/a6a/veo_212.pdf (accessed: 14.04.2024).

7. Чистякова К.А., Юдин В.В. Практические методы управления реализацией инновационных проектов на основе использования программного обеспечения Jira. *Наука и искусство управления. Вестник Института экономики, управления и права Российского государственного гуманитарного университета.* 2023;(1):80–93. https://doi.org/10.28995/2782-2222-2023-1-80-93

Chistyakova KA, Yudin VV. Practical Methods for Managing the Implementation of Innovative Projects Based on the Use of the Jira Software. *Science and Art of Management. Bulletin of the Institute of Economics, Management and Law of the Russian State University for the Humanities*. 2023;(1):80–93. (In Russ.) https://doi.org/10.28995/2782-2222-2023-1-80-93

8. Вершинин В.П., Шмидт В.Р. Российские системы управления проектами: характеристики и тенденции развития. *Экономика устойчивого развития.* 2023;54(2):167–171. https://doi.org/10.37124/20799136_2023_2_54_167

Vershinin VP, Schmidt VR. Russian Project Management Systems: Characteristics and Development Trends. *Economics of Sustainable Development*. 2023;54(2):167–171. (In Russ.) https://doi.org/10.37124/20799136_2023_2_54_167

9. Тучина А.В., Воронова А.Г. Автоматизация бизнеса на основе облачных сервисов с учетом технологических трендов в ИТ-секторе. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля.* 2023;70(4):115–118.

Tuchina AV, Voronova AG. Business Automation Based on Cloud Services Considering IT-Sector's Sustainable Technological Trends. *Vestnik. Lugansk State University named after Vladimir Dahl*. 2023;70(4):115–118. (In Russ.)

10. Кочнев М.М. Анализ существующих методологий управления проектами и разработка методологии управления цифровыми продуктами. *Научные исследования.* 2023;37(1):23–27. URL: https://scientificresearch.ru/images/PDF/2023/42/analizsushchestvuyushchikh.pdf (дата обращения: 14.04.2024).

Kochnev MM. Analysis of Existing Project Management Methodologies and Development of a Digital Product Management Methodology. *Nauchnye issledovaniya*. 2023;37(1):23–27. (In Russ.) URL: https://scientificresearch.ru/images/PDF/2023/42/analizsushchestvuyushchikh.pdf (accessed: 14.04.2024).

11. Agbejule A, Lehtineva L. The Relationship between Traditional Project Management, Agile Project Management and Teamwork Quality on Project Success. *International Journal of Organizational Analysis.* 2022;30(7):124–136. https://doi.org/10.1108/ijoa-02-2022-3149

12. Ганьжа Д. Uptime Institute в России. *Журнал сетевых решений/LAN*. 2013;(2):4–15. URL: https://www.osp.ru/lan/2013/02/13033998 (дата обращения: 12.06.2024).

Gan'zha D. Uptime Institute in Russia. *LAN. Network Solutions Magazine*. 2013;(2):4–15. (In Russ.) URL: https://www.osp.ru/lan/2013/02/13033998 (accessed: 12.06.2024).

13. Wiboonrat M. Condition-Based Maintenance for Data Center Operations Management. In book: A Petrillo, F De Felice, G Lambert-Torres, E Bonaldi (eds). *Operations Management — Emerging Trend in the Digital Era*. London: IntechOpen; 2021. P. 16–21. https://doi.org/10.5772/intechopen.93945

14. Иноземцева С.А., Абдрахманов А.Р. Роль облачных технологий для социально-экономических систем бизнеса. В: *Сб. ст. V Юбилейной Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Вызовы цифровой экономики: импортозамещение и стратегические приоритеты развития»*. Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет; 2022. С. 720–724.

Inozemtseva SA, Abdrakhmanov AR. The Role of Cloud Technologies for Socio-Economic Systems of Business. In: *Proc. V Anniversary All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Challenges of the Digital Economy: Import Substitution and Strategic Development Priorities”*. Bryansk: BGITU Publ.; 2022. P. 720–724. (In Russ.)

15. Воронова А.Г., Шаренко М.М. Разработка проекта модернизации подсистемы IT-инфраструктуры университета. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2022;55(1):46–51.

Voronova AG, Sharenko MM. Development of University Subsystem IT-Infrastructure Modernization Project. *Vestnik. Lugansk State University named after Vladimir Dahl*. 2022;55(1):46–51. (In Russ.)

Об авторе:

Анна Геннадьевна Воронова, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономической кибернетики и прикладной статистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), SPIN-код, ORCID, annaec@ya.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Anna G. Voronova, Cand.Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Economic Cybernetics and Applied Statistics, Luhansk Vladimir Dahl State University (20a, Molodezhnyy Block, Luhansk, 291034, Luhansk People’s Republic), SPIN-code, ORCID, annaec@ya.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 12.07.2024
Принята к публикации / Accepted 22.07.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT





УДК 004.021

Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-283-292

Разработка алгоритма семантической сегментации данных дистанционного зондирования Земли для определения фитопланктонных популяций



EDN: SICESA

Ю.В. Белова, И.Ф. Развеева ✉, Е.О. Рахимбаева

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация



✉ razveevai@mail.ru

Аннотация

Введение. Компьютерное зрение широко используется для семантической сегментации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Метод позволяет контролировать экосистемы, в том числе водные. Востребованы алгоритмы, обеспечивающие качество семантической сегментации снимков ДЗЗ, в частности, для выявления областей с фитопланктоном, где возможно цветение воды — причина заморов. Цель исследования — создание алгоритма, обрабатывающего спутниковые данные как входную информацию для формирования и верификации математических моделей гидродинамики, по которым отслеживается состояние водных объектов. В литературе описаны различные алгоритмы семантической сегментации. Новые исследования сосредоточены на повышении надежности распознавания — чаще с помощью нейросетей. Этот подход совершенствуется в представленной работе. Для развития направления предлагаются новый набор сведений из открытых источников и синтетические данные для улучшения обобщающей способности модели. Впервые область контура фитопланктонной популяции сравнивается с базой данных — и так формируются граничные условия для реализации математических моделей и построения гранично-адаптивных сеток.

Материалы и методы. Набор снимков ДЗЗ дополнили с помощью авторского аугментационного алгоритма на языке Python. Компьютерное зрение сегментировало области фитопланктонных популяций на снимках. Сверточную нейронную сеть (СНС) U-Net обучили на базе ускорителей вычислений NVIDIA Tesla T4.

Результаты исследования. Для автоматизации обнаружения областей распространения фитопланктона разработан алгоритм компьютерного зрения, основанный на СНС U-Net. Модель оценили по вычисленным значениям основных метрик качества, относящихся к задачам сегментации. Получены следующие значения метрик: Precision = 0,89, Recall = 0,88, F1 = 0,87, Dice = 0,87 и IoU = 0,79. Графическая визуализация результатов обучения СНС на обучающем и валидационном наборах показала хорошее качество обучения модели. Об этом свидетельствуют малые изменения функции потерь в конце обучения. Выполненная моделью сегментация оказалась близка к ручной разметке, что говорит о высоком качестве предложенного решения. По площади одного пикселя рассчитали площадь сегментированной области фитопланктонной популяции. Полученный результат для исходного изображения — 51202,5 (по информации о количестве пикселей, относящихся к цветению сине-зеленых водорослей). Соответствующий итог моделирования — 51312.

Обсуждение и заключение. Исследование расширяет теоретические и практические знания о применении сверточных нейронных сетей для семантической сегментации данных космических снимков. Учитывая итоги работы, можно оценить потенциал автоматизации процесса семантической сегментации данных ДЗЗ для определения границ фитопланктонных популяций с помощью искусственного интеллекта. Применение предложенной модели компьютерного зрения для получения контуров цветения воды из-за фитопланктона позволит создать базы данных — основу для экологического мониторинга водных ресурсов и прогностического моделирования гидробиологических процессов.

Ключевые слова: экологический мониторинг водных ресурсов, границы фитопланктона, контур цветения воды, цветение воды из-за сине-зеленых водорослей, сегментация данных космических снимков

Благодарности. Авторы благодарят научного консультанта проекта члена-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, профессора А.И. Сухинова.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 22–71–10102 «Математические модели и параллельные алгоритмы для прогнозирования динамики фитопланктонных популяций в морских системах с учетом обмена кислородом и углекислым газом на суперкомпьютерных вычислительных системах»).

Для цитирования. Белова Ю.В., Развеева И.Ф., Рахимбаева Е.О. Разработка алгоритма семантической сегментации данных дистанционного зондирования Земли для определения фитопланктонных популяций. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):283–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-283-292

Original Empirical Research

Development of an Algorithm for Semantic Segmentation of Earth Remote Sensing Data to Determine Phytoplankton Populations

Yulia V. Belova, Irina F. Razveeva ✉, Elena O. Rakhimbaeva
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ razveevai@mail.ru

Abstract
Introduction. Computer vision is widely used for semantic segmentation of Earth remote sensing (ERS) data. The method allows monitoring ecosystems, including aquatic ones. Algorithms that maintain the quality of semantic segmentation of ERS images are in demand, specifically, to identify areas with phytoplankton, where water blooms— the cause of suffocation — are possible. The objective of the study is to create an algorithm that processes satellite data as input information for the formation and checking of mathematical models of hydrodynamics, which are used to monitor the state of water bodies. Various algorithms for semantic segmentation are described in the literature. New research focuses on enhancing the reliability of recognition — often using neural networks. This approach is modified in the presented work. To develop the direction, a new set of information from open sources and synthetic data are proposed. They are aimed at improving the generalization ability of the model. For the first time, the contour area of the phytoplankton population is compared to the database — and thus the boundary conditions are formed for the implementation of mathematical models and the construction of boundary-adaptive grids.
Materials and Methods. The set of remote sensing images was supplemented with the author's augmentation algorithm in Python. Computer vision segmented areas of phytoplankton populations in the images. The U-Net convolutional neural network (CNN) was trained on the basis of NVIDIA Tesla T4 computing accelerators.
Results. To automate the detection of phytoplankton distribution areas, a computer vision algorithm based on the U-Net CNN was developed. The model was evaluated by the calculated values of the main quality metrics related to segmentation tasks. The following metric values were obtained: Precision = 0.89, Recall = 0.88, F1 = 0.87, Dice = 0.87, and IoU = 0.79. Graphical visualization of the results of CNN learning on the training and validation sets showed good quality of model learning. This is evidenced by small changes in the loss function at the end of training. The segmentation performed by the model turned out to be close to manual marking, which indicated the high quality of the proposed solution. The area of the segmented region of the phytoplankton population was calculated by the area of one pixel. The result obtained for the original image was 51202.5 (based on information about the number of pixels related to the bloom of blue-green algae). The corresponding result of the modeling was 51312.
Discussion and Conclusion. The study expands theoretical and practical knowledge on the use of convolutional neural networks for semantic segmentation of space imagery data. Given the results of the work, it is possible to assess the potential for automating the process of semantic segmentation of remote sensing data to determine the boundaries of phytoplankton populations using artificial intelligence. The use of the proposed computer vision model to obtain contours of water bloom due to phytoplankton will provide for the creation of databases — the basis for environmental monitoring of water resources and predictive modeling of hydrobiological processes.

Keywords: environmental monitoring of water resources, phytoplankton boundaries, water bloom contour, blue-green algae bloom, space image data segmentation

Acknowledgements. The authors would like to thank the project scientist A.I. Sukhinov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math), Professor.

Funding Information. The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22–71–10102 “Mathematical Models and Parallel Algorithms for Predicting the Dynamics of Phytoplankton Populations in Marine Systems Taking into Account the Exchange of Oxygen and Carbon Dioxide on Supercomputer Computation Systems”).

For Citation. Belova YV, Razveeva IF, Rakhimbaeva EO. Development of an Algorithm for Semantic Segmentation of Earth Remote Sensing Data to Determine Phytoplankton Populations. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):283–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-283-292

Введение. В различных сферах деятельности необходимы автоматизированные алгоритмы для обработки информации, полученной со спутников. Решение фундаментальных и прикладных задач экологии требует сегментирования участков в соответствии с фокусом внимания исследователей. Это оптимизирует процесс изучения и моделирования гидробиологических процессов. В качестве примера такого локального интереса можно привести цветение воды из-за распространения фитопланктона. Явление имеет значение для текущего и комплексного мониторинга водных ресурсов. Его хорошо видно со спутников при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ).

Цветение воды заметно влияет на ее качество в поверхностных источниках, используемых для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения [1]. По реакции фитопланктонных популяций в гидрологической среде можно достоверно судить об общем состоянии водной экосистемы [2]. Негативные последствия неконтролируемого размножения водорослей — это массовая гибель рыбы (замор), рост нагрузки на водопроводные очистные сооружения [3], загрязнение берегов и пляжей [4].

Систематические замеры на автоматических станциях контроля качества воды, а также получение данных исследовательских экспедиций — это трудоемкие и дорогостоящие мероприятия. Дополнительный источник информации о состоянии фитопланктонного сообщества — современные спутниковые системы, оснащенные съемочной аппаратурой. Они позволяют дистанционно фиксировать состояние биомассы водорослей, отслеживать ее динамику в заданный временной промежуток.

Значимое преимущество спутниковых данных как инструмента мониторинга водных ресурсов — возможность полномасштабного и оперативного контроля в любой точке Земли. Широкий обзор акватории, как правило, дает исследователям значительный объем полезной информации. Но, несмотря на активное развитие систем на основе алгоритмов компьютерного зрения, задача выделения контуров интересующих областей на данных ДЗЗ до сих пор не решена в полной мере.

Хорошие результаты дают разные алгоритмы семантической сегментации на снимках. С их помощью можно выявить и уточнить границы и структуру природных объектов. В [5] показана эффективность метода LBP (от англ. local binary patterns — локальные бинарные шаблоны) для распознавания объектов, состоящих из криволинейных контуров. LBP обеспечивает высокую резкость краев и детализацию данных спутникового зондирования Земли. В [6] отмечается, что для повышения надежности распознавания следует сочетать алгоритмы искусственного интеллекта и такие классические методы выделения контуров изображений, как операторы Собеля, Кирша и Лапласа. В [7] предлагается комплексный подход для семантической обработки спутниковых изображений неограниченного размера с применением нейросетевых моделей U-Net, которые при выделении объектов показали значение F1-меры от 0,78 до 0,91.

В исследовании [8] дается обзор интеллектуальных методов решения задачи семантической сегментации данных на спутниковых снимках. Авторы приходят к выводу, что в этом случае наиболее эффективны и производительны именно нейросетевые алгоритмы. В качестве примера приводится сверточная нейронная сеть (СНС), обученная на нескольких тысячах спутниковых снимков штата Массачусетс (США). Точность модели составила 85,31 %.

В работе [9] рассмотрены семантическая сегментация, сегментация экземпляра и паноптическая сегментация. Названы преимущества использования методов глубокого обучения, реализованных в архитектурах таких СНС, как SegNet, U-Net и DeepLab.

В [10] автоматизированная обработка спутниковых изображений основывается на сочетании набора данных SpaceNet и достижений в области компьютерного зрения, которые стали возможны благодаря глубокому обучению. В данной работе представлены пять подходов, основанных на улучшениях моделей U-Net и Mask R-Convolutional Neuronal Networks. Значения метрик для лучших моделей: средняя точность (average precision, AP) и средний отклик (average recall, AR) 0,937 и 0,959 соответственно.

Эффективное применение СНС для обнаружения инверсионных следов на спутниковых снимках описано в [11]. Доказано, что при масштабном мониторинге инверсионных следов с измерением их воздействия на климат подход на основе СНС архитектуры U-Net демонстрирует F1-меру, равную 0,52, с общей средней вероятностью обнаружения 0,51.

Особый интерес вызывают модели 2023 года: Segment Anything (SAM), Language-Segment-Anything (Lang-SAM) и HQ-SAM. Это динамические инструменты глубокого обучения, способные прогнозировать маски объектов по изображениям с помощью подсказок ввода. Ряд исследователей уже применили этот подход для анализа аэрофотоснимков и данных ДЗЗ. Точность определения областей интереса оказалась высокой [12]. В [13] значение F1 достигает 86,5 % ± 4,1 %. В дальнейшем модели подобной архитектуры с различными модификациями (Polyp-SAM, Grounding DINO и пр.) позволят выполнять как интерактивную (требующую вмешательства пользователя), так и автоматическую сегментацию.

Для обработки ДЗЗ все шире внедряются интеллектуальные технологии. Отмечается высокая точность моделей. Особое внимание уделяется методам на основе таких СНС, как SegNet, U-Net, DeepLab в сочетании с классическими методами предобработки изображений. Активно развивается обобщенный подход к сегментации.

В настоящей работе рассматривается решение задачи из области усвоения данных ДЗЗ методом компьютерного зрения. Показано применение СНС U-Net для сегментации областей, содержащих фитопланктонные популяции. Созданный авторами алгоритм позволяет сегментировать области интереса и вычислять их площади, что необходимо для дальнейшего анализа при решении задач гидродинамики и гидробиологии.

Приведенные ниже четыре пункта описывают научную новизну представленного исследования.

1. Сформирован набор данных из открытых источников.

2. Для улучшения обобщающей способности модели сгенерированы синтетические данные. С этой целью применили собственный алгоритм аугментации для большей устойчивости модели к шумам при практическом использовании [14].

3. Реализована интеллектуальная модель, основанная на СНС архитектуры U-Net на высокоуровневом языке Python. Ее ключевые гиперпараметры оптимизированы с помощью библиотеки Optuna и проверены на тестовом наборе данных.

4. Сравниваются области найденного контура, содержащего фитопланктонные популяции, с имеющейся базой данных. Таким образом сформированы граничные условия для последующей реализации математических моделей и построения гранично-адаптивных сеток.

Для достижения поставленной цели требуется решить ряд задач:

– подготовить базу данных ДЗЗ, содержащую области интереса участки цветения воды;

– обосновать и описать топологию СНС U-Net;

– выполнить аугментацию данных для создания расширенного репрезентативного набора;

– реализовать, оптимизировать, отладить и протестировать СНС архитектуры U-Net;

– определить значения ключевых метрик качества модели для сегментации;

– вычислить площади сегментированного контура с учетом масштаба исходного изображения.

Теоретическая значимость исследования обусловлена расширением представлений о возможностях применения технологии компьютерного зрения в области мониторинга водных ресурсов. Практическая значимость заключается в разработке прикладного кроссплатформенного и масштабируемого инструмента для анализа снимков ДЗЗ с целью фиксации областей интереса в водных экосистемах.

Материалы и методы. Для геопространственного анализа задействовали доступное программное обеспечение с открытым исходным кодом, с помощью которого часто решаются экологические задачи [15].

Исследование основано на актуальных спутниковых данных. Внимание авторов фокусируется на состоянии водоемов в период цветения сине-зеленых водорослей. Анализ этой информации позволяет:

– прогнозировать объем и распределение фитопланктона по акватории [16];

– контролировать физические и биологические процессы, определяющие скорость роста фитопланктона и накопление биомассы [17];

– анализировать климатические изменения на основе прогноза динамики процесса цветения [18];

– детально изучить процесс обмена CO_2 между водным объектом и воздухом [19].

Для автоматизации процесса обнаружения областей распространения фитопланктонных популяций и вычисления их площадей предлагается разработать алгоритм компьютерного зрения на основе СНС архитектуры U-Net.

В качестве обучающей выборки для алгоритма глубокого обучения взяли 20 космических снимков таких водных объектов, как Черное, Каспийское, Азовское моря и др. Фото получены в разных точках земной поверхности.

На первом этапе изображения разметили, чтобы преобразовать информацию в формат, доступный для понимания алгоритмом компьютерного зрения, который будет выполнять сегментацию. Выбирали из двух распространенных подходов к предоставлению аннотаций:

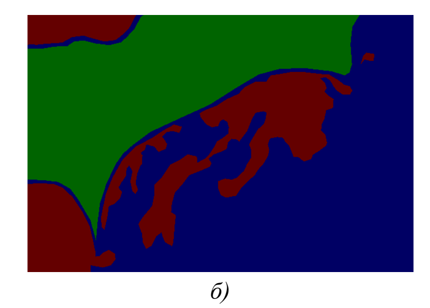
– создание маски пиксельного уровня;

– выделение границ многоугольника для области интереса.

Применили первый вариант, где файлы масок на уровне пикселей представляют собой области интереса для алгоритма. Размеченные маски — это файлы с расширением jpeg или png. Пропорции соответствуют изображению, которое они аннотируют. На рис. 1 представлен пример исходного изображения и его маски, где зеленым цветом обозначена суша, синим — водная поверхность, красным — область фитопланктонной популяции.



а)



б)

Рис. 1. Разметка изображений: *а* — исходное изображение; *б* — маска изображения

Для увеличения числа изображений в наборе данных применили авторский аугментационный код, дополненный шумовыми эффектами. При создании расширенного набора данных использовали следующие модификации исходных изображений:

– поворот на произвольный угол;
– отображение по осям OX и OY;
– обрезка;
– масштабирование;
– цветокоррекция.

Все изменения проводились с учетом шумов, которые могут появиться на реальных изображениях, полученных при ДЗЗ, и сегментировались с помощью разработанного алгоритма.

Отметим преимущество авторского алгоритма создания дополнительных исходных данных. В условиях ограниченного набора реальных снимков использование для обучения искусственно созданных изображений позволит провести более тонкую настройку разработанной модели, оптимизировать ее параметры и сделать более устойчивой к искажениям при практическом применении.

Архитектура СНС U-Net разработана для решения задачи сегментации биомедицинских данных. При ее выборе определяющим фактором стал относительно малый размер исходных данных, с которым на практике U-Net показывает удовлетворительные результаты.

Архитектура СНС U-Net основана на взаимодействии слоев свертка + пулинг, которые сначала уменьшают пространственное разрешение картинки (энкодер), а потом увеличивают его, предварительно объединив с данными картинки и пропустив через другие слои свертки (декодер) (рис. 2).

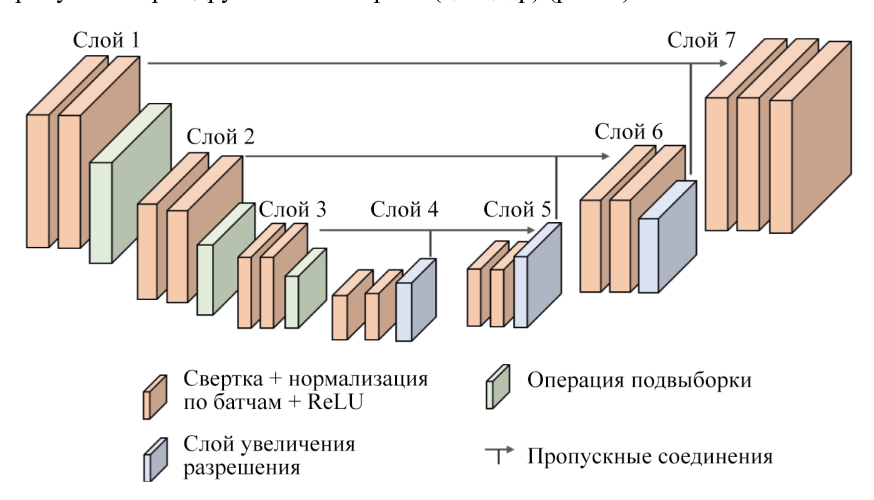


Рис. 2. Архитектура СНС U-Net

Сверточные блоки декодера и энкодера соединены сквозными связями, или пропускными соединениями (англ. skip connections). Это решает проблему затухающего градиента, актуальную для компьютерного зрения [20]. В данном исследовании использовали энкодер от нейронной сети ResNet-50, предобученной на датасете ImageNet.

Для подбора гиперпараметров СНС U-Net, влияющих на архитектуру и процесс обучения, задействовали библиотеку Optuna. Это позволило автоматизировать настройку модели для достижения лучших результатов.

Результаты исследования. В таблице 1 представлены параметры модели, заданные при обучении.

Таблица 1

Параметры при обучении сверточной нейронной сети U-Net

№	Параметр	Значение
1	Количество изображений в тренировочной выборке	700
2	Количество изображений в валидационной выборке	200
3	Количество изображений в тестовой выборке	100
4	Размер пакета	10
5	Коэффициент скорости обучения	1e–4
6	Детектор переобучения	Ранняя остановка
7	Оптимизатор	Adam

Модель обучалась при помощи оптимизации функции потерь Дайса функции (Dice loss) (2), основанной на коэффициенте Дайса (1).

$$DSC = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|}, \quad (1)$$

$$Dice\ Loss = 1 - \frac{2|X \cap Y| + Smooth}{|X| + |Y| + Smooth}. \quad (2)$$

Здесь X — это множество пикселей, определенных в ходе разметки как область конкретного класса; Y — множество пикселей, отнесенных к конкретному классу согласно выводам разработанной сегментационной модели. Коэффициент Smooth используется для сглаживания результата вычисления в случае, когда значения X и Y близки к нулевым.

Для обучения модели использовали метод стохастической оптимизации Adam. В качестве детектора переобучения взяли раннюю остановку. В машинном обучении это один из самых широко используемых методов регуляризации для предотвращения переобучения. Процесс обучения проводился на базе ускорителей вычислений NVIDIA Tesla T4, реализован за 100 эпох и занял 55 минут.

На рис. 3. представлен график обучения СНС на обучающем и на валидационном наборе. По оси OX отложены эпохи обучения, а по оси OY — значения функции потерь. Анализируя график можно сделать вывод о хорошем качестве обучения модели, так как в конце обучения на тренировочной выборке наблюдаются малые изменения функции потерь.

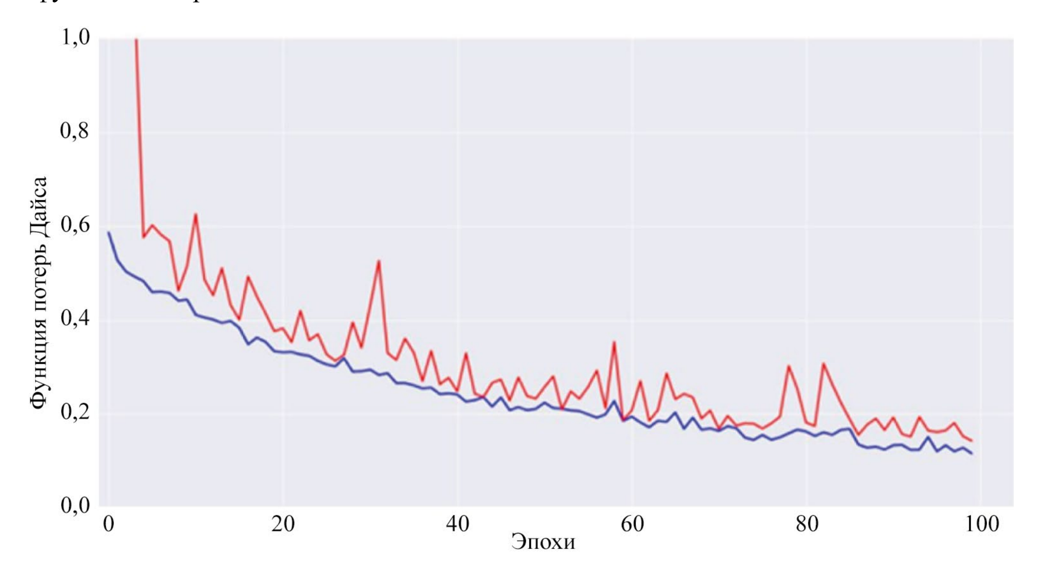


Рис. 3. Обучение СНС U-Net: — на обучающей выборке; — на валидационной выборке

При оценке качества моделей сегментации применяется коэффициент Дайса и метрика степени пересечения между двумя ограничивающими рамками (англ. Intersection over Union — IoU, индекс Жаккара), определяемая по формуле:

$$IoU = \frac{X \cap Y}{X \cup Y}, \qquad (2)$$

где X — это множество пикселей, определенных в ходе разметки как область конкретного класса; Y — множество пикселей, отнесенных к конкретному классу согласно выводам разработанной модели сегментации.

В таблице 2 представлены значения попиксельной точности, полноты, F1-меры, коэффициента Дайса и IoU. Для получения итогового значения IoU вычисляется среднее взвешенное по значениям данной метрики для каждого класса.

Таблица 2

Результаты оценки качества модели на тестовой выборке

Показатель	Precision	Recall	F1	Dice	IoU
Среднее значение по тестовой выборке	0,89	0,88	0,87	0,87	0,79

На рис. 4 представлены итоги работы алгоритма по сегментированию областей водных ресурсов, суши и фитопланктонных популяций. Полученные результаты удовлетворяют задачам мониторинга водных ресурсов и имеют практическую ценность.

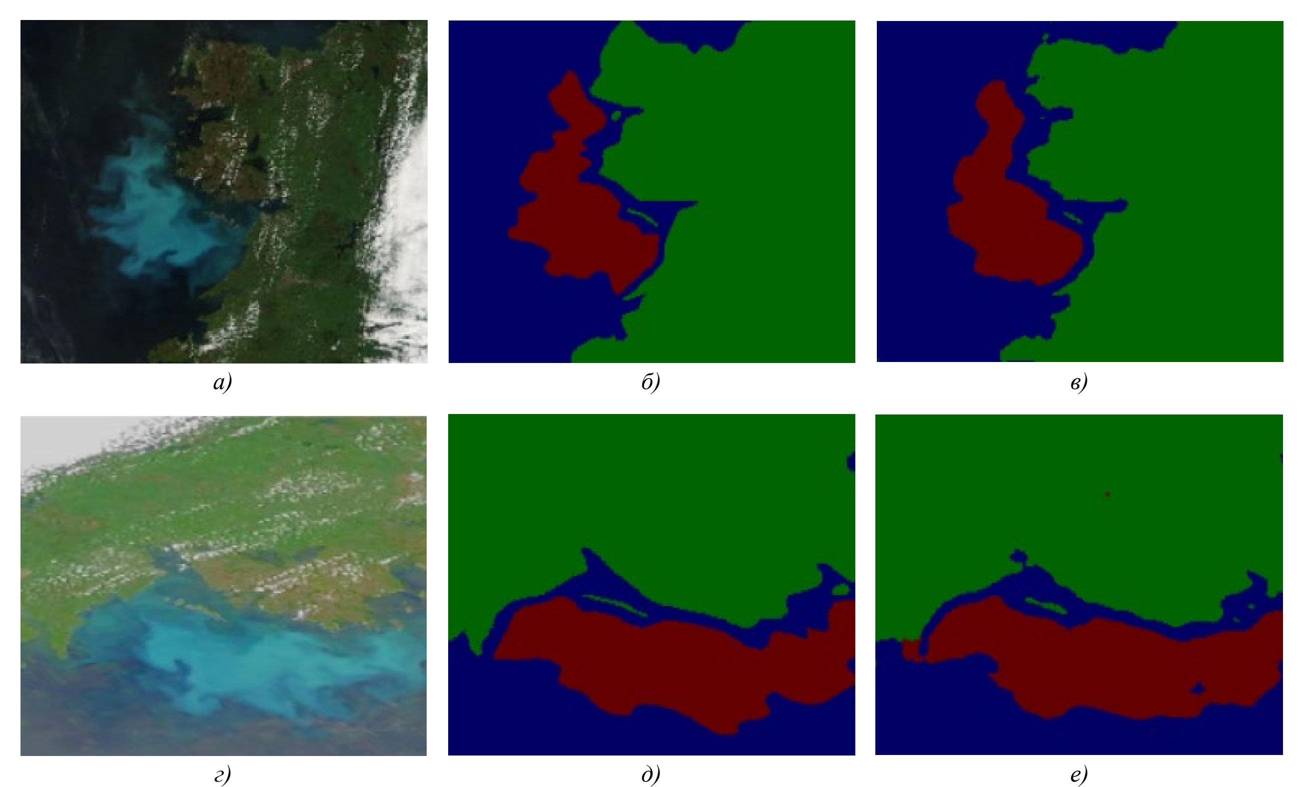


Рис. 4. Результаты работы алгоритма по сегментированию областей водных ресурсов, суши и фитопланктонных популяций: *а*, *г* — исходное изображение; *б*, *д* — ручная разметка; *в*, *е* — результат работы модели

Результат сегментации на рисунке 4 *в* и 4 *е* визуально близок к ручной разметке, что говорит о высоком качестве работы модели. Площадь сегментированной области фитопланктонной популяции рассчитали, оценив площадь одного пикселя. Каждое приведенное изображение имеет дополнительные метаданные с обозначением масштаба изображения и его разрешения. На основе этого значения вычисляется площадь, занимаемая каждым пикселем. В рассмотренном случае для рис. 4 *а* итоговое значение — 51 202,5. Цифра получена согласно информации о количестве пикселей, относящихся к цветению сине-зеленых водорослей, из набора сегментированных снимков фитопланктонных популяций в прибрежных системах [21]. Результат вычислений для рис. 4 *в* — 51 312.

Обсуждение и заключение. При оценке состояния водных ресурсов компьютерное зрение и другие алгоритмы машинного обучения позволяют освободить специалистов от монотонных операций. Их выполняют интеллектуальные системы. В этом случае мониторинг может вестись круглосуточно. Алгоритм будет адекватно

прогнозировать риски, моделировать развитие ситуации и поддерживать принятие оперативных решений. Сохраненные и тиражированные знания в формате баз данных и реестров могут использоваться для создания долгосрочных источников информации, к которым исследователи будут обращаться при анализе состояния водоемов и построении климатических моделей.

Обработка данных ДЗЗ в виде семантических контуров позволит верифицировать сложные математические модели за счет уточнения граничных и начальных условий, повысить достоверность, скорость и надежность прогностического моделирования гидробиологических процессов.

Список литературы / References

1. Yun Zhang, Wanli Gao, Yuying Li, Yeqing Jiang, Xiaonuo Chen, Yinlei Yao, et al. Characteristics of the Phytoplankton Community Structure and Water Quality Evaluation in Autumn in the Huaihe River (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2021;18(22):12092. https://doi.org/10.3390/ijerph182212092

2. Huang Yiqiang, Shen Yucheng, Zhang Shouzhi, Li Yang, Sun Zeyu, Feng Mingming, et al. Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Indication to Water Quality in the Lake in Agricultural Areas. *Frontiers in Environmental Science.* 2022;10:1–14. http://doi.org/10.3389/fenvs.2022.833409

3. Говорова Ж.М., Говоров О.Б. Влияние фитопланктона на формирование качества воды и методы его удаления. Часть 1. *С.О.К. Сантехника. Отопление. Кондиционирование. Энергосбережение.* 2019;206(2):32–35. URL: https://www.c-o-k.ru/articles/vliyanie-fitoplanktona-na-formirovanie-kachestva-vody-i-metody-ego-udaleniya-chast-1 (дата обращения: 04.06.2024).

Govorova ZhM, Govorov OB. Influence of Phytoplankton on the Formation of Water Quality and Methods of its Removal. Part 1. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2019;206(2):32–35. (In Russ.) URL: https://www.c-o-k.ru/articles/vliyanie-fitoplanktona-na-formirovanie-kachestva-vody-i-metody-ego-udaleniya-chast-1 (accessed: 04.06.2024).

4. Ерина О.Н., Пуклаков В.В., Соколов Д.И., Гончаров А.В. Подледное цветение фитопланктона в Можайском водохранилище. *Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова.* 2019;15(2):49–54. URL: https://biorosinfo.ru/upload/file/journal_56.pdf (дата обращения: 04.06.2024).

Erina ON, Puklakov VV, Sokolov DI, Goncharov AV. Subglacial Phytoplankton Bloom in the Mozhaisk Reservoir. *Yu.A. Ovchinnikov Bulletin of Biotechnology and Physical and Chemical Biology*. 2019;15(2):49–54. (In Russ.) URL: https://biorosinfo.ru/upload/file/journal_56.pdf (accessed: 04.06.2024).

5. Panasenko ND, Poluyan AYu, Motuz NS. Algorithm for Monitoring the Plankton Population Dynamics Based on Satellite Sensing Data. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2131(3):032052. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032052

6. Панасенко Н.Д., Ганжур М.А., Ганжур А.П. Исследование применения космических снимков для определения объектов на поверхности водоемов. *Инженерный вестник Дона.* 2020;72(12):376–387. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_19__11_Panasenko_Ganzhur1.pdf_244b44d819.pdf (дата обращения: 04.06.2024).

Panasenko ND, Ganzhur MA, Ganzhur AP. Multichannel Satellite Image Application for Water Surface Objects Identification. *Engineering Journal of Don*. 2020;72(12):376–387. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_19__11_Panasenko_Ganzhur1.pdf_244b44d819.pdf (accessed: 04.06.2024).

7. Янакова Е.С., Тюрин А.А. Комплексный алгоритм семантической обработки спутниковых изображений. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2020;(10):183–189.

Yanakova ES, Tyurin AA. Complex Algorithm for Semantic Processing of Satellite Images. *Izvestiya TulGU.* 2020;(10):183–189.

8. Друки А.А., Спицын В.Г., Болотова Ю.А., Башлыков А.А. Семантическая сегментация данных дистанционного зондирования Земли при помощи нейросетевых алгоритмов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(1):59–68. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46113/1/bulletin_tpu-2018-v329-i1-07.pdf (дата обращения: 04.06.2024).

Druki AA, Spitsyn VG, Bolotova YuA, Bashlykov AA. Semantic Segmentation of Earth Remote Sensing Data Using Neural Network Algorithms. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. *Geo Assets Engineering*. 2018;329(1):59–68. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46113/1/bulletin_tpu-2018-v329-i1-07.pdf (accessed: 04.06.2024).

9. Лукашик Д.В. Анализ современных методов сегментации изображений. *Экономика и качество систем связи.* 2022;24(2):57–65. URL: https://journal-ekss.ru/wp-content/uploads/2022/06/57-65.pdf (дата обращения: 04.06.2024).

Lukashik DV. Analysis of Modern Image Segmentation Methods. *Economics and Quality of Communication Systems.* 2022;24(2):57–65. URL: https://journal-ekss.ru/wp-content/uploads/2022/06/57-65.pdf (accessed: 04.06.2024).

10. Mohanty S, Czakon J, Kaczmarek K, Pyskir A, Tarasiewicz P, Kunwar S, et al. Deep Learning for Understanding Satellite Imagery: An Experimental Survey. *Frontiers in Artificial Intelligence.* 2020;3:534696. http://doi.org/10.3389/frai.2020.534696

11. Hoffman JP, Rahmes TF, Wimmers AJ, Feltz WF. The Application of a Convolutional Neural Network for the Detection of Contrails in Satellite Imagery. *Remote Sensing*. 2023;15(11):2854. https://doi.org/10.3390/rs15112854

12. Ren Yougui, Xiaomei Yang, Zhihua Wang, Ge Yu, Yueming Liu, Xiaoliang Liu, et al. Segment Anything Model (SAM) Assisted Remote Sensing Supervision for Mariculture — Using Liaoning Province, China as an Example. *Remote Sensing*. 2023;15(24):5781. https://doi.org/10.3390/rs15245781

13. Alagialoglou L, Manakos I, Papadopoulou S, Chadoulis R-T, Kita A. Mapping Underwater Aquatic Vegetation Using Foundation Models With Air- and Space-Borne Images: The Case of Polyphytos Lake. *Remote Sensing.* 2023;15(16):4001. https://doi.org/10.3390/rs15164001

14. Бескопыльный А.Н., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Развеева И.Ф., Кожакин А.Н., Бескопыльный Н.А., Оноре Г.С. *Программа для аугментации изображений.* Патент РФ, № 2022685192. 2022. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022685192&TypeFile=html (дата обращения: 04.06.2024).

Beskopylny AN, Stelmakh SA, Shcherban EM, Razveeva IF, Kozhakin AN, Beskopylny NA, et al. Image Augmentation Software. RF Patent, No. 2022685192. 2022. (In Russ.) URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022685192&TypeFile=html (accessed: 04.06.2024).

15. Cortés IM. Open-Source Software for Geospatial Analysis*. Nature Reviews Earth and Environment*. 2023;4(143):1. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00401-4

16. Развеева И.Ф., Рахимбаева Е.О. Применение методов искусственного интеллекта при анализе скоплений фитопланктонных популяций на водной поверхности. В: *Тр. Междунар. науч. конф. «Интеллектуальные информационные технологии и математическое моделирование»* (*ИИТ&ММ-2022*). Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2022. С. 45–49.

Razveeva IF, Rakhimbaeva EO. Application of Artificial Intelligence Methods in the Analysis of Phytoplankton Populations on the Water Surface. In: *Proc. International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies and Mathematical Modeling"*. Rostov-on-Don: DSTU Publ. House; 2022. P. 45–49.

17. Hopkins JE, Palmer MR, Poulton AJ, Hickman AE, Sharples J. Control of a Phytoplankton Bloom by Wind-Driven Vertical Mixing and Light Availability. *Limnology and Oceanography.* 2021;66:1926–1949. https://doi.org/10.1002/lno.11734

18. Yanhui Dai, Shangbo Yang, Dan Zhao, Chuanmin Hu, Wang Xu, Donald M Anderson, et al. Coastal Phytoplankton Blooms Expand and Intensify in the 21st Century. *Nature*. 2023;615:280–284. https://www.nature.com/articles/s41586-023-05760-y

19. Asselot R, Lunkeit F, Holden P, Hense I. Climate Pathways behind Phytoplankton-Induced Atmospheric Warming. *Biogeosciences*. 2022;19(1):223–239. http://doi.org/10.5194/bg-19-223-2022

20. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (*CVPR*). New York City: IEEE; 2016. P. 770–778. https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385

21. Белова Ю.В., Развеева И.Ф., Рахимбаева Е.О. *Программа для оконтуривания области фитопланктонных популяций в прибрежных системах*. Патент РФ, № 2022685220. 2022. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022685220&TypeFile=html (дата обращения: 04.06.2024).

Belova YuV, Razveeva IF, Rakhimbaeva EO. A Program for Delineating the Area of Phytoplankton Populations in Coastal Systems. RF Patent, No. 2022684631. 2022. (In Russ.) URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022685220&TypeFile=html (accessed: 04.06.2024).

Об авторах:

Юлия Валериевна Белова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, yvbelova@yandex.ru

Ирина Федоровна Развеева, старший преподаватель кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, razveevai@mail.ru

Елена Олеговна Рахимбаева, аспирант, ассистент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, lena_rahimbaeva@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Ю.В. Белова: программная реализация и тестирование интеллектуального алгоритма на основе глубокого обучения для обработки данных спутниковых наблюдений, анализ качества алгоритма сегментации по данным натурных наблюдений.

И.Ф. Развеева: программная реализация, обучение и отладка интеллектуального алгоритма на основе глубокого обучения для обработки данных спутниковых наблюдений, корректировка текста статьи.

Е.О. Рахимбаева: сбор и предобработка обучающего набора данных, реализация процесса аугментации данных, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yulia V. Belova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mathematics and Computer Science Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, yvbelova@yandex.ru

Irina F. Razveeva, Senior Lecturer of the Construction of Unique Buildings and Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, razveevai@mail.ru

Elena O. Rakhimbaeva, Postgraduate student, Teaching assistant of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, lena_rahimbaeva@mail.ru

Claimed Contributorship:

YuV Belova: software implementation and testing of an intelligent algorithm based on deep learning for processing satellite observation data, analysis of the quality of the segmentation algorithm based on field observations.

IF Razveeva: software implementation, training and debugging of an intelligent algorithm based on deep learning for processing satellite observation data, correction of the text.

E Rakhimbaeva: collection and preprocessing of the training data set, implementation of the data augmentation process, formatting of the article.

Conflict of Interest Statement: **the authors claimed no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 21.06.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 15.07.2024
Принята к публикации / Accepted 24.07.2024

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 519.688/534–16
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-293-300

Оригинальное эмпирическое исследование

Алгоритм обработки рентгеновских изображений с использованием нечеткой логики



EDN: PLDLKG

А.С. Маннаа
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
mannaa@sfedu.ru

Аннотация

Введение. Для улучшения диагностики заболеваний коленного сустава необходимо повысить качество обработки рентгенографических изображений, т.е. дать специалистам более точную информацию для анализа патологии. Цель исследования — показать возможности нечеткой логики в совершенствовании алгоритма определения опорных линий и углов сгибания колена. Для этого необходима программа, которая анализирует рентгеновские снимки. Известные на сегодня методы, описанные в научной и прикладной литературе, недостаточно автоматизированы. В ряде случаев ортопедам и хирургам приходится вручную дорабатывать изображения, корректировать линии. Этот пробел восполняет представленная работа. Описан созданный автором алгоритм, который не предполагает участия человека, автоматически идентифицирует линии и углы сгибания колена. По результату, выданному системой, врач может, во-первых, судить о наличии патологии. Во-вторых, сведения, предоставляемые программой, позволяют точнее планировать, проводить операции и назначать терапию.

Материалы и методы. Использовались снимки двух рентгеновских аппаратов, которые работают в больнице Аль-Базель (Латакия, Сирия). Для программной реализации алгоритма задействовали язык «Питон» (Python). Решение протестировали на 500 пациентах больницы Аль-Базель. Сравнивались результаты, которые сгенерировала новая система и предшествующие версии программ обработки рентгеновских снимков.

Результаты исследования. Создан, описан и реализован на практике алгоритм построения опорных линий и углов для обработки рентгеновских снимков коленного сустава. Показаны возможности нечеткой логики в автоматизации обнаружения двойного порога при выявлении границ кости на изображениях. Описана работа усовершенствованного гауссовского фильтра, предназначенного для обработки рентгенограмм.

Модифицированный метод анализа рентгеновских снимков коленных костей включает разработку алгоритма для автоматического обнаружения структур и аномалий в коленных суставах, определения и измерения анатомических параметров, оценку степени повреждения и т.д.

Метод определения границ контуров на рентгенограммах объединил детектор Кэнни, алгоритм водораздела и нечеткую логику. Программа реализована в медицинской практике и показывает точность 98 %, затрачивая на обработку снимка менее 20 секунд.

Обсуждение и заключение. Новая система дает высокую точность, приемлемую оперативность и не требует ручной корректировки снимков. Специалисты получили возможность выявить малозаметные индикаторы нарушений. Кроме того, новый метод позволяет разобраться в сложных случаях, когда сочетаются несколько факторов, указывающих на возможную патологию. Широкое внедрение метода повысит качество медицинских услуг в ортопедии. Следует продолжить научные изыскания в данном направлении для расширения набора стратегий лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата. Предстоит создать решения с абсолютной точностью, более высокой оперативностью обработки, а также методы, подходящие для анализа других суставов.

Ключевые слова: опорные линии в рентгенографии, углы коленных суставов в рентгенографии, алгоритм Кэнни, усовершенствованный фильтр Гаусса, алгоритм водораздела

Для цитирования. Маннаа А.С. Алгоритм обработки рентгеновских изображений с использованием нечеткой логики. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):293–300. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-293-300

Original Empirical Research

Algorithm for Processing X-ray Images Using Fuzzy Logic

Ali Sajae Mannaa ✉
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ mannaa@sfedu.ru

Abstract

Introduction. To improve the diagnostics of knee joint diseases, it is necessary to enhance the quality of processing radiographic images, i.e., to provide experts with more accurate information for pathology analysis. The objective of the study is to demonstrate the capabilities of fuzzy logic in improving the algorithm for determining reference lines and knee flexion angles. This requires a program that analyzes X-ray images. The methods known today, described in scientific and applied literature, are not sufficiently automated. In some cases, orthopedists and surgeons have to manually refine images and adjust lines. This gap is filled by the presented work. The algorithm developed by the author is described. It does not involve human participation and automatically identifies the lines and angles of knee flexion. Based on the result issued by the system, the doctor can, firstly, judge the presence of pathology. Secondly, the information provided by the program allows for more accurate planning, performing operations, and prescribing therapy.

Materials and Methods. Images from two X-ray machines operating in Al-Basel Hospital (Latakia, Syria) were used. The Python language was used for the software implementation of the algorithm. The solution was tested on 500 patients at Al-Basel Hospital. The results generated by the new system and previous versions of X-ray image processing programs were compared.

Results. An algorithm for constructing reference lines and angles for processing knee joint X-ray images is created, described, and implemented in practice. The capabilities of fuzzy logic in automating double threshold detection when identifying bone boundaries in images are shown. The operation of an improved Gaussian filter designed for processing X-ray images is described. The modified method of knee bone X-ray analysis includes the development of an algorithm for automatic detection of structures and anomalies in knee joints, determination and measurement of anatomical parameters, assessment of the degree of damage, etc. The method for determining the contour boundaries on radiographs combined the Canny detector, the watershed algorithm, and fuzzy logic. The program has been implemented in medical practice and shows 98% accuracy, spending less than 20 seconds to process the image.

Discussion and Conclusion. The new system provides high accuracy, acceptable efficiency, and does not require manual correction of images. Experts are now able to identify subtle indicators of disorders. In addition, the new method makes it possible to understand complex cases when several factors are combined, indicating potential pathology. Widespread implementation of the method will improve the quality of medical services in orthopedics. Scientific research in this direction should be continued to expand the set of strategies for the treatment of diseases of the musculoskeletal system. It is necessary to create solutions with absolute accuracy, higher processing efficiency, as well as methods suitable for analyzing other joints.

Keywords: reference lines in radiography, knee joint angles in radiography, Canny algorithm, improved Gaussian filter, watershed algorithm

For Citation. Mannaa AS. Algorithm for Processing X-ray Images Using Fuzzy Logic. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2024;24(3):293–300. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-293-300

Введение. Анализ рентгеновских изображений позволяет выявлять и оценивать различные патологические состояния [1]. Значительный вклад в повышение четкости и точности интерпретаций рентгеновских снимков внесли алгоритмы сегментации изображений и определения границ кости. Однако такая визуализация все еще нуждается в улучшении, т. к. бывает не вполне определенной, оставляет возможности для разных толкований [2].

Достижения в области интеллектуальных вычислений позволяют задействовать нечеткую логику для устранения неточностей и двусмысленности при анализе медицинских изображений. Нечеткая логика имитирует мышление человека, и это надежная основа для создания алгоритмов, способных эффективно обрабатывать и анализировать рентгеновские изображения [3].

В работе [4] референтные линии и их взаимосвязи изучались с целью коррекции формы ног. В [5] клинические результаты лечения многоосных деформаций нижних конечностей сравнивались с тем, как это отражается на рентгеновских снимках. В литературе описаны программные продукты, способные анализировать рентгеновские снимки костей. Однако все эти системы имеют общий недостаток: иногда они неверно распознают контуры. Если такое происходит, то специалист дорабатывает изображение вручную. Эта проблема решается в представленной научной работе. Предлагается новый алгоритм анализа рентгеновских изображений с использованием нечеткой

логики и усовершенствованных традиционных подходов. Решение исключает необходимость ручной доработки снимков. Программа работает с высокой точностью и достаточной оперативностью. Она позволяет точнее выявлять и характеризовать аномалии на рентгеновских изображениях, то есть улучшает диагностику.

Материалы и методы. При выполнении данной научной работы автор исходил из того, что оценка деформаций конечностей требует анализа анатомических и механических осей длинных костей, а также углов между ними. На рис. 1 показаны исходные пределы углов для здоровых людей разного возраста. Если показатель вне этих пределов, значит, у пациента деформирована конечность и требуется хирургическое вмешательство.

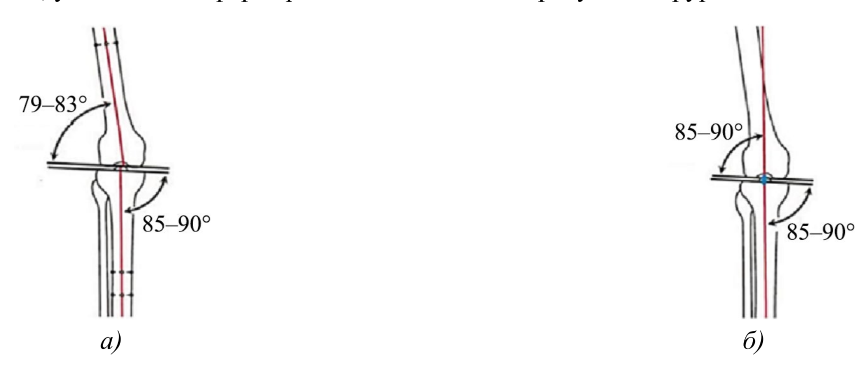


Рис. 1. Опорные углы между механическими осями для здоровых людей: *а* — для молодых; *б* —для пожилых [4]

В ортопедии понятия механической и анатомической оси имеют решающее значение для представления о расположении и функции костей, особенно в нижних конечностях. Анатомическая ось проходит по центру костного стержня, через середину диафиза. Механическая ось отражает направление действующих на нее сил. В нижних конечностях она проходит от центра тазобедренного сустава до центра голеностопного сустава.

Исследуя механическую ось, можно понять несущую способность и распределение нагрузки в кости. Это особенно важно для диагностики и лечения остеоартритов, переломов и для определения положения имплантатов или протезов.

Необходимо знать особенности анатомической оси, чтобы отличить естественную кривизну от патологической. Это важно в том числе при оперативных вмешательствах, поскольку помогает хирургам понять, правильно ли расположена кость.

Для оценки анатомии бедренной и большеберцовой костей особенно важны два показателя:

- ALDFA (англ. axial length of the distal femoral axis — осевая длина дистальной оси бедра, ОДДОБ);
- MPTA (англ. medial proximal angle of the tibia — медиальный проксимальный угол большеберцовой кости, МПУБК).

Они крайне информативны, если нужно выявить деформации колена. ALDFA определяет ориентацию дистальной части бедра относительно ее продольной оси, MPTA показывает наклон медиальной поверхности большеберцовой кости относительно ее механической оси (рис. 2).

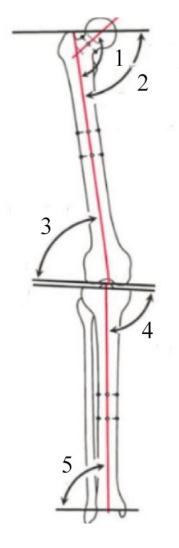


Рис. 2. Углы между бедренной и большеберцовой костями, используемые для оценки анатомии и выявления патологии: 1 — медиальный колено-диафизарный угол (МКДУ) = 130° (124°–136°); 2 — медиальный проксимальный бедренный угол (МПБУ) = 84° (80°–89°); 3 — ОДДОБ = 81° (79°–83°); 4 — МПУБК = 87° (85°–90°); 5 — латеральный дистальный большеберцовый угол (ЛДБУ) = 89° (85°–92°) [5]

Углы, показанные на рис. 2, в комплексе демонстрируют возможности выравнивания коленного сустава или его деформации. Ортопеды ориентируются на норму (цифры в скобках), чтобы сделать выводы о типе, тяжести деформаций и разработать план лечения [6].

Алгоритм распознавания контуров Кэнни — это надежный метод, широко используемый для идентификации контуров на изображениях. Он строит опорные линии и углы по рентгеновским изображениям следующим образом. На первом этапе в используется улучшенный фильтр Гаусса, который сглаживает изображение, уменьшает шум [7]. Далее — вычисление градиентов с использованием операторов Собеля или Прюитт. Метод часто используется для определения краев изображения. Это позволяет учитывать и слабые границы, и сильные. Так алгоритм точнее определяет границы и эффективнее снижает уровень шума.

Несмотря на свою вычислительную сложность, алгоритм Кэнни остается базовым для компьютерного зрения благодаря способности справляться с шумом и четко различать границы.

Для верного выбора значения стандартного отклонения сравниваются абсолютные значения точки $x(i, j)$ в сером пикселе [8]. Если $|x(i, j)| < |x(i, j)| \times |x(i, j) - \mu|$, то стандартное отклонение $\sigma = 1$. В этом случае точка менее подвержена воздействию шума. Стандартное отклонение $\sigma = 1{,}6$ указывает на значительный шум.

Для автоматического определения границ ($T1$, $T2$) Кэнни использует двойную пороговую обработку, классифицирует пикселы на изображении по интенсивности серого цвета. Вычисляем среднее значение всех пикселов ($T1$), после чего $T1$ используется для разделения изображения на две области — объект и фон. Значения пикселов, превышающие начальное пороговое значение $T1$, принимаются за объекты, а остальные — за фон. Теперь есть два набора значений: одно для объекта (*ob*), а другое для фона (*bg*). Для каждой из двух областей (объект, фон) рассчитывается пороговое значение. Вычислим $T2$. Начнем с того, что:

$$T0 = \left(Tob + Tbg\right) / 2. \quad (1)$$

Новое значение $T0$ принимается за $T1$, и процесс повторяется до тех пор, пока $T0 \sim= T1$. Конечное значение $T0$ принимается за $T2$.

На последнем этапе применяется привязка границ для определения связанных компонентов границ на изображении VNSA (англ. valgus knee shaft angle — вальгусная надколенно-бедренная суставная ось). Это помогает объединить разрозненные границы в более крупные структуры, что улучшает восприятие и анализ изображения. При этом целесообразно интегрировать принципы нечеткой логики и традиционные программные подходы к определению границ. В этом случае используются функции принадлежности, которые присваивают степени принадлежности пикселам на основе значений интенсивности серого цвета, что позволяет получить детализированное представление о краях.

В отличие от бинарного подхода метод нечетких множеств облегчает постепенный переход в диапазоне значений принадлежности от 0 (полное отсутствие принадлежности) до 1 (полная принадлежность), фиксируя неточности границ. Фаззификация преобразует четкие данные изображения в нечеткие множества с учетом неопределенности. Дефаззификация преобразует нечеткие результаты в четкие для дальнейшего анализа.

Заметное преимущество метода — его адаптивность к реальным сценариям, особенно с различной степенью шума и неоднозначности. Однако для достижения оптимальной производительности может потребоваться тщательная настройка параметров, поэтому крайне важно найти баланс между чувствительностью и специфичностью в приложениях для определения границ [9].

Можно добиться более детального представления о краях, если устранить неоднозначность границ изображений. Для этого необходимо присвоить пикселам степени принадлежности.

Каждый пиксел обрабатывается с использованием нечетких правил. Если выполняется какое-либо из нечетких правил, показанных на рис. 3, то пиксел обрабатывается как ребро, в противном случае он не учитывается. Это позволяет выделить границы объектов, которые отличаются от шума и других элементов изображения. Важность данного решения доказана применительно к анализу плечевой кости по рентгеновским снимкам [10].

I3 = 1 I1&&I2&&I4&&I5&&I6&&I7&&I8 = 0		I8 = 1 I1&&I2&&I3&&I4&&I5&&I6&&I7 = 0	
I4 = 1 I1&&I2&&I3&&I5&&I6&&I7&&I8 = 0		I3 = 1, I4 = 1, I5 = 1, I1&&I2&&I6&&I7&&I8 = 0	
I5 = 1 I1&&I2&&I3&&I4&&I6&&I7&&I8 = 0		I1 = 1, I2 = 1, I3 = 1, I4&&I5&&I6&&I7&&I8 = 0	
I6 = 1 I1&&I2&&I3&&I4&&I5&&I7&&I8 = 0		I5 = 1, I6 = 1, I7 = 1, I1&&I2&&I3&&I4&&I8 = 0	
I8 = 1 I1&&I2&&I3&&I4&&I5&&I6&&I7 = 0		I1 = 1, I7 = 1, I8 = 1, I1&&I2&&I3&&I4&&I8 = 0	

Рис. 3. Правила нечеткой логики

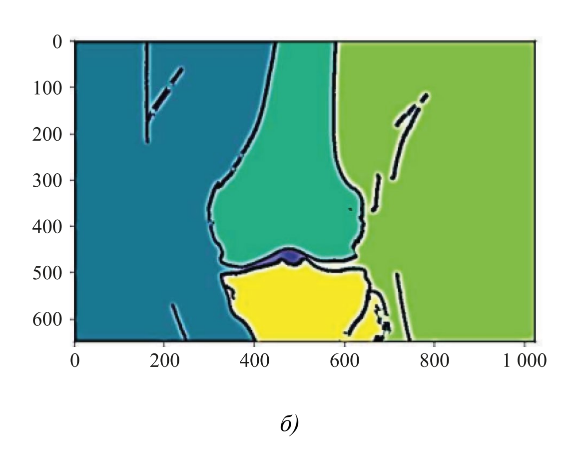
Алгоритм сегментации по водоразделам используется в компьютерном зрении для распознавания объектов. Изначально его разрабатывали для картографии. И сейчас он воспринимает изображения как топографический ландшафт, где интенсивность оттенков серого соответствует высоте местности. Линии водораздела очерчивают отдельные объекты как границы между водосборными бассейнами. Заполняя ландшафт от локальных минимумов, алгоритм разделяет объекты по интенсивности серого цвета.

Алгоритм определения водораздела эффективен для некоторых приложений, однако он бывает чувствителен к шуму и может привести к чрезмерной сегментации. На практике для повышения производительности используются тщательная предварительная обработка и управляемые маркерами варианты водораздела [11].

Результат работы алгоритма Watershed показан на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Результат работы алгоритма водораздела: *а* — исходное изображение; *б* — результат определения водоразделов

Результаты исследования. После использования алгоритма водораздела рисуются контуры для исследуемых точек [12]. Для построения опорных линий рассчитали крайние точки по контуру метки (выбранной области) кости. Затем вычислили центр масс, преобразовали изображение в двоичный формат и нашли его центр. Определив крайние точки с четырех сторон, взяли середину вершины верхней кости, середину основания нижней кости и провели линию.

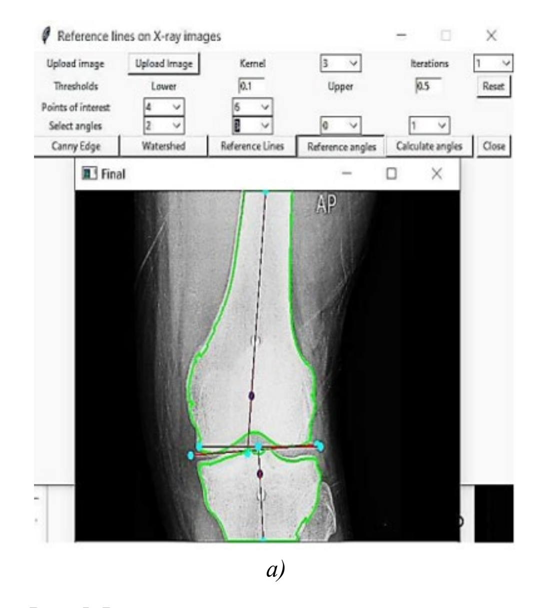
Используем формулу для вычисления угла между двумя прямыми и три координатные точки: *aa*, *bb* и *cc*. Две являются крайними точками обеих прямых, а одна — общей точкой их пересечения [13].

$$b = -a \times x_1 + y_1, \tag{2}$$

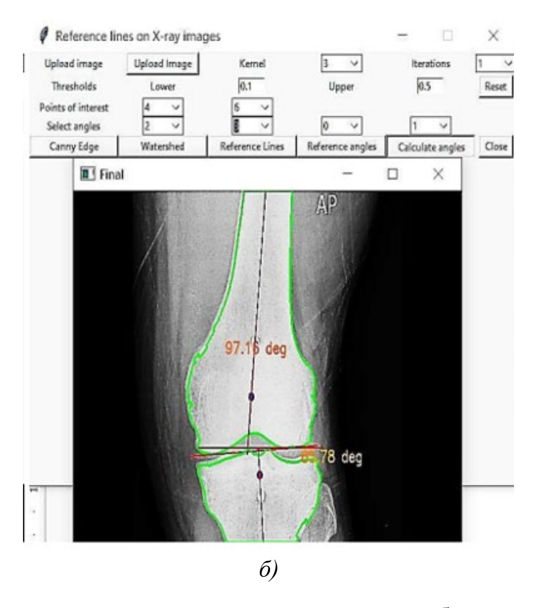
$$x_1 = y_1 - b \div a,\ x_2 = y_2 - b \div a, \tag{3}$$

$$a = 1{,}0 \times (y_2 - y_1) \div 1{,}0 \times (x_2 - x_1). \tag{4}$$

На рис. 5 показан результат построения опорных линий и углов на рентгеновских снимках.



а)



б)

Рис. 5. Результаты использования усовершенствованного алгоритма водораздела на рентгеновских изображениях: *а* — построение опорных линий; *б* — расчет углов

Работу детектора границ Кэнни [14] сравнили с результатами, которые показал новый, предложенный автором алгоритм. Очевидна более высокая производительность последнего решения. Это объясняется, во-первых, улучшением оператора Кэнни. Во-вторых, новый метод интегрирован с усовершенствованным фильтром Гаусса, поэтому отпадает необходимость в дополнительном фильтре и сокращается время выполнения алгоритма. Его реализация значительно повысила точность и дала лучшие результаты, особенно для изображений радиальных линий с высоким уровнем шума.

Новое решение внедрили в больнице Аль-Базель в Латакии. Использовались изображения с двух рентгеновских аппаратов. Программу применили к рентгеновским изображениям 500 пациентов. В 490 случаях не потребовалась ручная доработка, т. е. точность результатов — 98 %. Обработка изображения занимает около 20 секунд.

Предложенный алгоритм программно реализован на языке «Питон» (Python) с графическим интерфейсом. Схема создания опорных линий и углов для обработки рентгеновских изображений коленного сустава призвана улучшить интерпретацию рентгенографических изображений (рис. 6).

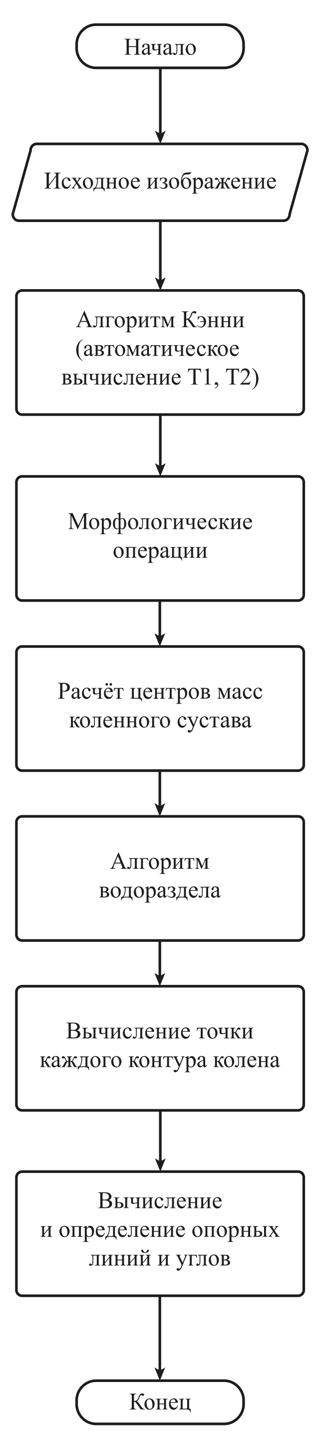


Рис. 6. Усовершенствованный алгоритм создания опорных линий и углов для обработки рентгеновских изображений коленного сустава

Обсуждение и заключение. Новый подход к исследованию рентгеновских снимков колена используется в больнице Аль-Базель (Латакия). Практика показала ценность усовершенствованного автоматизированного анализа изображений для повышения точности диагностики. Отметим, что даже более ранняя версия программы эффективно выявляет аномалии кости, не замеченные при визуальном анализе [15]. С помощью предложенного решения ортопеды могут качественно прорабатывать малозаметные факторы, указывающие на нарушения, а также сочетания показателей, которые способны внести путаницу и помешать выявлению патологии. Из этого следует, что использование подхода, описанного в данной статье, позволяет обоснованно рассчитывать на повышение качества медицинских услуг в сфере ортопедии и хирургии. Специалисты получают инструментарий для более точного планирования и проведения операций. Кроме того, новое решение открывает возможности для лучшей организации консервативного лечения с учетом индивидуальных особенностей патологии.

Следует продолжить научные изыскания в данном направлении для расширения диагностических возможностей и набора стратегий лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата. Представляет интерес, в частности, достижение абсолютной, т. е. 100-процентной точности алгоритмического определения линий. Следовало бы также сократить время обработки снимков. Оптимизация вычислительных процессов позволит получать результаты быстрее, что особенно актуально при неотложной диагностике. Кроме того, целесообразно доработать метод, чтобы применять его для анализа более сложных клинических случаев. Еще одно перспективное направление — адаптация алгоритма для анализа других суставов, например тазобедренного или плечевого.

Список литературы / References

1. Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С. Об одном алгоритме анализа структуры рентгенографических медицинских изображений. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2018;197(1):23–28. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2018-1-23-28

Al-Temimi Ammar Mudheher Sadek, Pilidi VS. On an Algorithm for Structure Analysis of X-ray Medical Images. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series.* 2018;197(1):23–28. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2018-1-23-28

2. Jassam KI. Removal of Random Noise from Conventional Digital X-Ray Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1993;29:113–118. https://doi.org/n10y2021/7227

3. Ruiyuan Liu, Jian Mao. Research on Improved Canny Edge Detection Algorithm. In: *Proc. 2nd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering, (EITCE). MATEC Web of Conferences.* 2018; 232(4):03053. https://doi.org/10.1051/matecconf/201823203053

4. Кулеш П.Н., Соломин Л.Н. Изменения взаимоотношений референтных линий при коррекции формы ног в соответствии с желаниями пациента. *Гений ортопедии.* 2021;27(3):390–397. https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-3-390-397

Kulesh PN, Solomin LN. Relationships between Reference Lines Altered during Leg Shape Correction as Requested by the Patient *Orthopaedic Genius.* 2021;27(3):390–397. https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-3-390-397

5. Riganti S, Nasto LA, Mannino S, Brunenghi GM, Boero S. Correction of Complex Lower Limb Angular Deformities with or without Length Discrepancy in Children Using the TL-HEX Hexapod System : Comparison of Clinical and Radiographical Results. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*. 2019;28(3):214–220. https://doi.org/10.1097/BPB.0000000000000573

6. Gaidel AB, Pervushkin SS. Research of the Textural Features for the Bony Tissue Diseases Diagnostics Using the Roentgenograms. *Computer Optics*. 2013;37(1):133–119. https://doi.org/10.18287/0134-2452-2013-37-1-113-119

7. Weibin Rong, Zhanjing Li, Wei Zhang, Lining Sun. An improved Canny Edge Detection Algorithm. In: *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA).* New York City: IEEE; 2014. P. 577–582. https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885761

8. Kaur EK, Mutenja V, Gill EIS. Fuzzy Logic Based Image Edge Detection Algorithm in MATLAB. *International Journal of Computer Applications.* 2010;1(22):55–58. http://doi.org/10.5120/442-675

9. Haibo Zhou, Hao Ying. A Method for Deriving the Analytical Structure of a Broad Class of Typical Interval Type-2 Mamdani Fuzzy Controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems.* 2013;21(3):447–458. http://doi.org/10.1109/TFUZZ.2012.2226891

10. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений.* Москва: Техносфера; 2005. 1072 с.

Gonzalez RC, Woods RE. *Digital Image Processing*. Moscow: Tekhnosfera; 2005. 1072 p. (In Russ.)

11. Abdelwahed Motwakel, Adnan Shaout, Gasm Elseed Ibrahim Mohamed. Dry Fingerprint Image Enhancement Using Fuzzy Morphology. *International Journal of Knowledge Engineering and Data Mining.* 2016;4(1):40–53. https://doi.org/10.1504/IJKEDM.2016.082074

12. Suhas S, Venugopal CR. An Efficient MRI Noise Removal Technique Using Linear and Nonlinear Filters. *International Journal of Computer Applications.* 2018;179(15):17–20. https://doi.org/10.5120/IJCA2018915777

13. Anam S, Uchino E, Misawa H, Suetake N. Texture Analysis and Modified Level Set Method for Automatic Detection of Bone Boundaries in Hand Radiographs. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2014;5(10):117–126. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2014.051017

14. Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С. Автоматизация процесса определения референтных линий на рентгенографических медицинских изображениях. *Инженерный вестник Дона.* 2017;44(1):27–36. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_55_Temimi_Pelidi.pdf_02dcdf3989.pdf (дата обращения: 25.05.2024).

Al-Temimi Ammar Mudheher Sadek, Pilidi VS. Automating the Process of Determining the Reference Lines on the X-ray Medical Images. *Engineering Journal of Don.* 2017;44(1):27–36. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_55_Temimi_Pelidi.pdf_02dcdf3989.pdf (accessed: 25.05.2024)

15. Маннаа А.С., Муратова Г.В. Разработка алгоритма построения референтных линий и углов для коленных суставов на рентгеновских снимках. *Известия высших учебных заведений.Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2023;218(2):15–20. https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-2-15-20

Mannaa AS, Muratova GV. Development of Algorithm for Constructing Reference Lines and Angles for Knee Joints on X-ray Images. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North-Caucasian Region. Natural Sciences.* 2023;218(2): 15–20. https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-2-15-20

Об авторе:

Али Сажи Маннаа, аспирант кафедры информатики и вычислительного эксперимента института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета (344015, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21е, д. 1001), SPIN-код, ORCID, ScopusID, ResearcherID, mannaa@sfedu.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Ali Sajae Mannaa, Postgraduate Student, Department of Informatics and Computational Experiment, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University (21e, Zorge Str., Rostov-on-Don, 344015, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, ResearcherID, mannaa@sfedu.ru

Conflict of Interest Statement: **the author claimed no conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.05.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 17.06.2024
Принята к публикации / Accepted 26.06.2024